Direction générale de l'Aviation civile

Service technique de l'Aviation civile

Février 2014

Auscultation des chaussées souples aéronautiques au HWD

Guide technique



Ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie

www.stac.aviation-civile.gouv.fr

★ dgac

STAC

et de l'Énergie

Direction générale de l'Aviation civile

Service technique de l'Aviation civile

Février 2014

Auscultation des chaussées souples aéronautiques au HWD

Guide technique

Service technique de l'Aviation civile Département Infrastructures aéroportuaires

v1. 12/02/2014

Cet ouvrage fait partie de la collection des guides techniques du STAC.

Il a été élaboré par Michaël BROUTIN (STAC), et validé par un comité d'experts constitué de:

Jean-Maurice BALAY (IFSTTAR), Régis BOST (STAC), Sandrine BUYTET (Colas), Jean CARROGET (Colas), Emmanuel DELAVAL (LRPC Lille), Dominique GUEDON (LRPC Toulouse - DALETT), Cyril FABRE (Airbus), Sandrine FAUCHET (STAC), Yann FERREIRA (ADP), Sarah GOYER (LRPC Saint-Brieuc), François JULLEMIER (ADP), Serge LE CUNFF (STAC), Alain LORIOL (Ginger-CEBTP), Arnaud MAZARS (LRPC Toulouse - DALETT), Damien MOUNIER (STAC), Christophe PETIT (Université de Limoges), Jean-Michel PIAU (IFSTTAR), Benoît PICOUX (Université de Limoges), Cédric RENAULT (LRPC Lille), Jean-Michel SIMONIN (IFSTTAR), Cheikh THIAM (Egis), Jean-Baptiste TIGER (STAC), Guillaume VOISIN (LRPC Rouen), Louisette WENDLING (LRPC Autun).



Résumé

Le présent guide a pour but de proposer aux gestionnaires d'aérodromes une méthodologie d'auscultation de leur plateforme à l'aide du HWD (Heavy Weight Deflectometer). Il comprend des recommandations relatives à l'organisation opérationnelle d'une auscultation et à l'interprétation des résultats d'essais, basée sur une modélisation dynamique avancée.

Les recommandations opérationnelles incluent les informations relatives à l'auscultation de la plateforme et aux essais à réaliser. En particulier, les pré-requis à l'auscultation et à l'interprétation sont décrits, qui sont relatifs à l'appareil de mesure (précision, étalonnage) et aux informations nécessaires concernant la chaussée et les données de trafic. En cas d'informations parcellaires, les essais complémentaires à réaliser sont spécifiés.

Ensuite, la configuration matérielle optimale est identifiée, qui inclut par exemple le choix de la masse statique à laisser tomber, le système de tampons amortisseurs, ou le positionnement des géophones.

Le choix de la densité et de la localisation des points d'essai est discuté pour chaque partie d'une aire de mouvement (piste, voie de circulation, aire de stationnement), ainsi que les configurations d'essais, incluant le nombre de niveaux de chargement, et pour chacun d'entre eux le nombre de chutes à réaliser, afin d'évaluer respectivement la non-linéarité du comportement du sol support vis-à-vis du niveau de chargement, et la répétabilité des essais.

Les informations complémentaires à recueillir au cours de la campagne d'essais sont aussi décrites, notamment les mesures de température à réaliser dans la chaussée.

Les recommandations relatives à l'interprétation des résultats abordent la description du modèle mécanique préconisé et ses paramètres, ainsi que le processus de calcul inverse associé qui a été développé.

La représentation mécanique proposée pour la chaussée est d'abord exposée, et en particulier la prise en compte du chargement impulsionnel appliqué ainsi que l'optimisation des finesses et étendue du maillage éléments finis axisymétrique 2D retenu et les conditions d'interface.

Ensuite, le processus de calcul inverse dynamique est décrit, et en particulier la fonction objective à minimiser, le choix de l'erreur cible, et l'algorithme de convergence retenu.

Enfin, des corrections à appliquer aux paramètres identifiés, en fonction de la température dans la chaussée lors de l'essai et de la pseudo-fréquence du chargement sont proposées. Cette opération est fondamentale pour la cohérence de l'étape ultime consistant à déterminer une capacité portante de la chaussée ou une durée de vie résiduelle.

Tous les développements techniques présentés dans le guide ont été validés numériquement ou à l'aide d'essais *in situ*. La dernière partie du document est dédiée à des exemples d'illustration issus de cas d'étude réels.

Mots-clés

Auscultation des chaussées/HWD/Calculs inverses dynamiques/Modélisation aux éléments finis/Chaussées souples aéronautiques/Capacité portante d'une chaussée.

Summary

The present technical guidance aims at providing all airport technical managers an HWD pavement testing methodology. It gathers recommendations relative to operational survey and data analysis, based on an advanced dynamic modeling.

The operational recommendations include all information about platform survey and test carrying out. In particular, the requirements to meet before pavement testing and data analysis respectively are described, which consist of requirements relative to the device (precision, calibration), and necessary complementary information about the pavement and the traffic data. In case of a lack of information, the required additional tests are specified.

Then, relevant material configurations are identified, including for instance the choice of the static weight, the buffer system, or the geophones positioning.

The selection of the test point density and location for each type of area (runways, taxiways, aprons) is also discussed, as well as the tests configurations, including the number of loading levels and for each level the number of drops, respectively for pavement nonlinearity and test repeatability concerns.

The necessary complementary operations to be performed during the survey, including the temperature measurements in the pavement, are described too.

The recommendations relative to the data analysis gathers the description of both mechanical modeling and its parameters, and the associated backcalculation process developed.

First the mechanical pavement representation main characteristics are set out, and specifically the impulse load modeling, the mesh dimensions and fineness optimization, or the interfaces bonding conditions of the 2D axis-symmetrical finite element model used.

Then, the developed dynamical backcalculation process is explained, particularly the objective function to be minimized, the choice of target error, or the mathematical convergence algorithm.

Finally, corrections to be applied to the backcalculated parameters with regards to test temperature or loading frequency are proposed. This operation is essential for the validity of the following step, i.e. the calculation of the pavement bearing capacity and/or residual life.

All parts of the guide have been validated, numerically or using in situ measurements. The last part of the document is dedicated to illustrations through real case studies.

Keywords

Pavement testing/HWD testing/Dynamical backcalculation/Finite Elements Modeling/Airfield flexible pavement/Pavement bearing capacity.

Sommaire

1. Préambule	11
1.1. But de l'auscultation structurelle des chaussées aéronautiques	11
1.2. Objet du guide	11
1.3. Historique du HWD	12
2. Principes généraux de l'auscultation au HWD	13
2.1. Description de l'outil HWD	13
2.2. Exemple de résultats	16
2.3. Représentativité du chargement	17
2.3.1. Enjeux	17
2.3.2. Choix de F _{max}	17
2.3.3. Relation Δt /Vitesse des avions	18
2.3.4. Pression sous la plaque de chargement	20
2.4. Principe du calcul inverse	21
2.4.1. Méthodes usuelles (« pseudo-statiques »)	21
2.4.2. Méthode préconisée par le STAC (« méthode dynamique »)	22
2.5. Corrections en température/fréquence	23
3. Pré-requis	25
3.1. À l'auscultation	25
3.1.1. Précisions attendues et étalonnage des appareils de mesure	25
3.1.2. Données relatives à l'infrastructure	30
3.1.3. Existence d'un protocole d'utilisation	30
3.2. À l'exploitation des résultats	31
4. Méthodologie d'auscultation	33
4.1. Conditions d'essais	33
4.1.1. Gamme de température	33
4.1.2. Réalisation d'essais à température constante	33
4.1.3. Suivi de la température	33
4.2. Établissement du plan d'essais	33
4.2.1. Piste ou voie de circulation	33
4.2.2. Parking	35
4.3. Opérations préalables aux essais	36
4.3.1. Mise en place de la centrale de température	36
4.3.2. Vérification du mesureur de distance automatisé	37
4.3.3. Préchauffe du matériel	37

37
38
38
40
40
40
40
40
40
40
41
41
41
41
43
44
44
46
46
47
47
47
49
49
51
54
54
55
57
57

7. Exemples d'application	59	
7.1. Exemple 1: exploitation d'essais réalisés sur la planche instrumentée du STAC	59	
7.1.1. Présentation de la campagne d'essais	59	
7.1.2. Opérations préalables	64	
7.1.3. Étude de linéarité et détermination de la profondeur de substratum	66	
7.1.4. Calcul inverse	66	
7.1.5. Cohérence des résultats	68	
7.2. Exemple 2: application de la méthode à l'auscultation d'une piste	69	
7.2.1. Configuration d'essais	69	
7.2.2. Structures de chaussée	70	
7.2.3. Analyses préliminaires	70	
7.2.4. Calcul inverse	70	
8. Terminologie	77	
9. Références bibliographiques		
Annexe : Logigramme de réalisation des essais	81	

Liste des figures

Figure 1:	Principe de fonctionnement du HWD; exemple d'un HWD à 9 géophones en configuration « chaussée souple ».	13
Figure 2:	Configuration de l'appareil; exemple d'un HWD à 9 géophones.	13
Figure 3:	Exemple de résultats bruts.	16
Figure 4:	Contenu fréquentiel des signaux d'effort et de déflexion.	16
Figure 5:	F (t) [kN] vs \mathcal{E}_i (t) [μ m/m], sous la charge.	18
Figure 6:	Relation entre Δt et la vitesse de passage d'une roue.	19
Figure 7:	Bassins de déformation \mathcal{E}_{xx} (bas GB) numérique et expérimental.	19
Figure 8:	Reconstitution d'un bassin de déflexion; méthode pseudo-statique.	21
Figure 9:	Exemple de vérification du capteur d'effort du HWD – vue d'ensemble.	26
Figure 10:	Exemple de vérification du capteur d'effort du HWD – détail de la chute 1.	26
Figure 11:	Exemple de vérification du capteur d'effort du HWD – détail du rebond principal de la chute 1.	27
Figure 12:	Vérification des données de déflexion du HWD à l'aide d'un ancrage profond ; capteur de la tête d'ancrage – vue d'ensemble.	28
Figure 13:	Vérification des données de déflexion du HWD à l'aide d'un ancrage profond ; comparaison des signaux – rebond principal.	29
Figure 14:	Emplacement des points de mesure sur piste (chaussée souple).	34
Figure 15:	Emplacement des points de mesure sur piste et voies de circulation.	35
Figure 16:	Mise en place de la centrale de température.	36
Figure 17:	Acquisition des déflexions HWD – exemple de signal aberrant.	41
Figure 18:	Acquisition des déflexions HWD – vérification de la bonne répétabilité.	42
Figure 19:	Utilisation des modules de surface pour la détermination de la linéarité.	43
Figure 20:	Exemple de détermination des zones homogènes via la méthode CUSUM réalisée sous PREDIWARE.	45
Figure 21:	Modèle aux éléments finis.	47
Figure 22:	Modélisation de l'effort.	49
Figure 23:	Relation pulsation/amortissement.	50
Figure 24:	Détermination de la fréquence de résonance f _r de la chaussée.	52
Figure 25:	Évolution de la profondeur de substratum p_{subst} et du module de sol E_{S} au cours de l'algorithme.	53
Figure 26:	Structure de la chaussée souple de la planche instrumentée du STAC.	60
Figure 27:	Canevas d'instrumentation d'une bande instrumentée (PS_1) de la chaussée souple de la planche d'essais du STAC.	60
Figure 28:	Réponse d'un capteur sol (1S ₀₁) sous chargement HWD – vue générale.	63
Figure 29:	Réponse d'un capteur sol (1S ₀₁) sous chargement HWD – vue détaillée de la réponse au premier rebond de la première chute.	63

Figure 30:	Dispersion des mesures des capteurs; évolution de la déformation verticale de contraction au sommet du sol sous chargement HWD.	64
Figure 31:	Dispersion des mesures des capteurs; évolution de la déformation verticale de contraction au sommet de la couche inférieure de GNT B sous chargement HWD.	64
Figure 32:	Dispersion des mesures des capteurs; évolution de la déformation verticale de contracti au sommet de la couche supérieure de GNT B sous chargement HWD.	ion 65
Figure 33:	Dispersion des mesures des capteurs; évolution de la déformation horizontale de traction à la base des matériaux bitumineux sous chargement HWD.	on 65
Figure 34:	Résultat du calage; PS_3L_1 ; point 0.	67
Figure 35 :	Comparaison des déformations numériques et expérimentales.	68
Figure 36:	CUSUM réalisé sur la déflexion maximale enregistrée sur le géophone central.	71
Figure 37:	Choix d'un point représentatif de la zone homogène ; bassin de déflexion du point représentatif vs bassins « minimal », « maximal », « moyen » et « moyen haut ».	72
Figure 38:	Choix d'un point représentatif de la zone homogène; bassins du point représentatif vs bassin « moyen haut ».	72
Figure 39:	Structure du point d'essais 474.	73
Figure 40:	Étude de linéarité réalisée sur le point 523.	74
Figure 41:	Détermination de la fréquence de résonance de la structure à partir de la FRF effort/déflexion du géophone extérieur.	75
Figure 42:	Détermination de la profondeur du substratum; résultat du calcul itératif.	75
Figure 43:	Résultat du calage, point 474.	77

Liste des tableaux

Tableau 1:	Emplacement des géophones de mesure (auscultation des chaussées souples); configuration optimale.	14
Tableau 2:	Emplacement des géophones de mesure (auscultation des chaussées souples); configuration minimale.	15
Tableau 3:	Évolution de la pseudo-fréquence ressentie par les matériaux en fonction de la profondeur, pour l'exemple traité en Figure 5.	18
Tableau 4:	Exemples numériques de relation Δt vs f.	20
Tableau 5:	Précisions requises pour les essais HWD.	25
Tableau 6:	Facteur de distribution de pression pour le calcul des modules de surface.	43
Tableau 7:	Canevas des points d'essais pour chaque capteur L ou T.	61
Tableau 8:	Canevas des points d'essais pour chaque capteur B ou H.	61
Tableau 9:	Canevas des points d'essais pour chaque capteur S.	61
Tableau 10:	Calcul inverse; PS_3L_1 ; point 0.	66
Tableau 11:	Résultat du rétrocalcul; $PS_{3}L_{1}$; point 0.	67
Tableau 12:	Structures de référence des différentes zones homogènes.	70
Tableau 13:	Calcul inverse, point 474; Modules initiaux et bornes de variation.	74
Tableau 14:	Résultat du rétrocalcul point 474.	76

1. Préambule

1.1. But de l'auscultation structurelle des chaussées aéronautiques

L'auscultation structurelle d'une chaussée consiste à évaluer, par des moyens externes, et non destructifs, contrairement à une campagne de sondages, sa capacité résiduelle à supporter un trafic d'aéronefs donné. Les résultats d'une étude d'auscultation peuvent se traduire soit en termes de capacité portante ou « portance », traduite en termes de charge admissible d'un aéronef pour un trafic donné, de portance RSI (Roue Simple Isolée) ou de PCN (*Pavement Classification Number*), soit en termes de durée de vie résiduelle.

Dans le premier cas, la capacité structurelle de la chaussée est définie par sa capacité à accueillir un trafic. Dans le second cas, une durée de vie de la chaussée est estimée sur la base du trafic prévisionnel que la chaussée sera amenée à recevoir dans les prochaines années.

L'étude de l'évolution de la capacité portante de la chaussée, ou de sa durée de vie résiduelle, permet, en corrélation avec des relevés de dégradation, de vérifier que le trafic actuel et/ou prévisionnel est acceptable, de déceler un comportement anormal de la plateforme, et au besoin d'anticiper des travaux d'entretien et/ou de rénovation.

Une auscultation régulière constitue donc pour le gestionnaire un outil essentiel de gestion rationnelle d'entretien d'une plateforme.

L'appareil d'auscultation structurelle non destructive des chaussées le plus répandu dans le monde est le HWD (*Heavy Weight Deflectometer*). L'exploitation des résultats se fait en trois étapes. La première étape dite « calcul inverse » consiste en une identification de paramètres : un modèle mécanique permettant de décrire le comportement de la chaussée sous chargement est choisi et les paramètres de ce modèle (ex : modules d'élasticité des matériaux, amortissement dans la structure,...) sont identifiés, ou « rétrocalculés ». La deuxième étape dite d'« analyse directe » consiste en un calcul des contraintes/déformations critiques dans la chaussée en prenant en compte les paramètres rétrocalculés lors de l'étape 1. Dans une troisième étape, des lois d'endommagement sont introduites afin d'estimer la capacité portante (RSI et PCN) de la chaussée et/ou sa durée de vie résiduelle, et le cas échéant de déterminer si des travaux sont nécessaires.

1.2. Objet du guide

Le présent document décrit la procédure d'auscultation des chaussées souples^{1,2}, d'une plateforme aéronautique à l'aide du HWD, ainsi que la méthodologie d'interprétation des résultats préconisées par le STAC. On entend ici par interprétation des résultats la réalisation de l'étape 1 définie ci-dessus, qui consiste, à partir de l'analyse des déflexions de surface, à définir des zones structurellement homogènes, puis pour chacune d'elles à déterminer la profondeur de substratum et les paramètres mécaniques des matériaux constitutifs de la chaussée.

Des guides techniques permettront à terme d'encadrer l'exploitation des résultats, à savoir la mise en œuvre des étapes 2- et 3-.

Le document est organisé de la manière suivante: les grands principes de l'auscultation au HWD sont d'abord rappelés; les pré-requis à l'auscultation ainsi qu'à l'exploitation des résultats sont ensuite présentés; en dernier lieu sont exposées les méthodologies d'auscultation et d'interprétation des résultats.

Ce guide ne comporte volontairement pas de volets « entretien de l'appareil » et « utilisation du matériel ». Ce type de documents dépend de chaque matériel, et est du ressort de chaque utilisateur.

¹ Dans l'acception aéronautique (chaussées bitumineuses, quelles que soient les épaisseurs), et non routière (chaussées légères). ² La méthodologie d'auscultation des chaussées rigides (chaussées en béton hydraulique) est en cours d'élaboration, et donnera lieu à la rédaction d'un guide dédié.

1.3. Historique du HWD

Le HWD est le descendant du déflectomètre à boulet [Bretonnière, 1963]. Cet appareil n'a jamais été développé en France, victime de son concurrent, le déflectographe Lacroix.

Jusqu'à la fin des années 1970, les auscultations structurelles non destructives étaient réalisées aux États-Unis à l'aide de vibreurs lourds. Les appareils à chargement transitoire impulsionnel, adaptés du déflectomètre à boulet, sont apparus au milieu des années 1980, avant de connaître un essor mondial au cours des années 1990. Ces appareils avaient en effet les multiples avantages d'être moins lourds, plus maniables, et moins chers que les vibreurs.

Le HWD est aujourd'hui devenu l'appareil de référence internationale pour l'auscultation des chaussées aéronautiques.

Plusieurs industriels produisent des HWD. Les principaux sont Dynatest et Kuab (USA), et Grontmij (DK).



Photo 1: Le HWD du STAC lors d'une mission d'expertise.

2. Principes généraux de l'auscultation au HWD

2.1. Description de l'outil HWD

Le HWD (*Heavy Weight Deflectometer*) est un appareil d'auscultation non destructive des chaussées aéronautiques permettant d'engendrer, par un système de masse tombante, un chargement de type impulsionnel à la surface de la chaussée, afin de simuler le passage d'une charge. La réponse de la chaussée à cette sollicitation (déflexions surfaciques) est mesurée au moyen de géophones³ placés sur une barre de mesure tandis qu'un capteur d'effort intégré à la plaque de chargement permet de suivre l'effort appliqué sur la chaussée au cours de l'essai (Figure 1).



Figure 1: Principe de fonctionnement du HWD; exemple d'un HWD à 9 géophones en configuration « chaussée souple ».

Le HWD permet d'ausculter les deux grands types de structures existants : les chaussées souples et rigides. Les géophones sont disposés (Figure 2), dans le cas des chaussées souples, sur une barre de mesure à l'avant de l'appareil dite « barre de mesure principale ».



Figure 2: Configuration de l'appareil; exemple d'un HWD à 18 géophones.

³ Les géophones mesurent une vitesse. L'ensemble du traitement du signal (application d'une fonction de transfert, et intégration) sont réalisés dans l'appareil, de sorte que l'utilisateur dispose directement des signaux de déflexions. Un système de pointes métalliques et de ressorts permet (Photo 2a) de rendre les géophones solidaires de la surface de la chaussée.



Photo 2: a) Vue de dessous du HWD: géophones sur la barre de mesure principale; plaque de chargement et masse tombante en arrière-plan.

b) Vue détaillée des cages de géophones fixées sur la barre de mesure principale.

Remarque: les deux tiges métalliques observables sur la photo 2a, ont été mises en place par le STAC pour des études spécifiques, notamment les essais sur capteurs. Elles permettent un placement à la surface de la chaussée et un alignement de précision.

Les appareils commerciaux proposent un nombre variable de géophones; *a minima* 9 quelle que soit la version. Les versions récentes en proposent 18.

Le STAC préconise l'utilisation de 15 géophones en configuration souple, les 3 autres étant réservés pour la mesure des battements de dalle en configuration rigide (G_{14} à G_{16}). Sur ces 15 géophones, 2 (G_{17} et G_{18}) sont placés à une distance par défaut de 5 m par rapport au centre de la plaque de chargement pour la détermination de la profondeur de substratum (voir 6.2), à l'aide d'une barre déportée conçue par le STAC (Photo 3) permettant d'ajuster librement la distance au centre de chargement d'un ou plusieurs géophones.

La configuration suivante est donc préconisée (Tableau 1), où r est la distance au centre de la plaque de chargement:

Géophone	G ₁	G_2	G3	<i>G</i> ₄	G 5	<i>G</i> ₆	G ₇	G_8	G 9	<i>G</i> ₁₀	G _{II}	<i>G</i> ₁₂	<i>G</i> ₁₃	<i>G</i> ₁₇	<i>G</i> ₁₈
r [cm]	0	30	40	50	60	75	90	105	120	150	180	210	240	-500	-500

Tableau 1: Emplacement des géophones de mesure; configuration optimale.



Photo 3 : Barre déportée conçue par le STAC ; HWD en configuration essais de nuit, sur la planche instrumentée du STAC.

Dans le cas d'une version à 9 géophones, la configuration « minimale » suivante sera choisie
--

Géophone	G_I	G_2	G_3	G ₄	G_5	G_6	G_7	G_8	G 9
r [cm]	0	30	40	60	90	120	150	180	210

Tableau 2: Emplacement des géophones de mesure; configuration minimale.

*Remarque: dans ce cas, un des géophones devra être ponctuellement déporté (G*⁸ par exemple) pour la réalisation des essais relatifs à la détermination de la profondeur de « substratum ».

La configuration « minimale » sera considérée pour les exemples présentés dans ce document, à l'exception de ceux de la partie 7 « Exemples d'application » qui s'appuient sur des essais réalisés en configuration optimale à 18 géophones.

2.2. Exemple de résultats

La Figure 3 présente les résultats d'un essai type, réalisé sur la chaussée souple de la planche d'essais instrumentée du STAC [STAC, 2012].

L'effort appliqué à la chaussée (courbe noire) est caractérisé par une valeur de pic F_{maxr} et un temps d'impulsion Δt_F . Les courbes violettes représentent les historiques de déflexion. Les déflexions maximales diminuent avec la distance au centre, et les abscisses temporelles auxquelles ils sont atteints augmentent, ce qui met en évidence le phénomène de propagation du signal.



Figure 3 : Exemple de résultats bruts.

La Figure 4 présente les contenus fréquentiels de ces mêmes signaux. Il apparaît qu'ils présentent tous un spectre inclus entre 0 et 80 Hz. Cette information sera notamment utile pour justifier les choix en matière de filtres lors de l'acquisition des résultats.



Figure 4: Contenu fréquentiel des signaux d'effort et de déflexion.

2.3. Représentativité du chargement

2.3.1. Enjeux

La méthode d'auscultation d'une chaussée au HWD repose sur l'analyse des déflexions induites par le chargement impulsionnel.

La réponse de la chaussée dépend de la forme du signal d'effort appliqué F, i.e. de sa valeur de pic F_{max} et de son temps d'impulsion Δt , correspondant à la largeur à 5 % du signal, i.e. la durée pendant laquelle $F \ge 5 \% \times F_{max}$. La dépendance vis-à-vis de F_{max} s'explique par le comportement potentiellement non linéaire des matériaux non traités sous-jacents, et celle vis-à-vis de Δt par le caractère viscoélastique des matériaux bitumineux de surface.

Il est donc important de cibler, via un choix judicieux de la configuration du matériel, une valeur de pic F_{max} et un temps d'impulsion Δt aussi représentatifs que possible du passage d'une roue d'avion.

2.3.2. Choix de F_{max}

La charge cible F_{max} représentative du trafic accueilli par la chaussée, doit être définie en amont de l'auscultation.

Idéalement, la valeur du pic d'effort doit être aussi proche que possible de la valeur de la Roue Simple Équivalente (RSE) de l'avion dimensionnant. La RSE est une charge conceptuelle qui, appliquée sur une plaque circulaire (de diamètre fixe valant 45 cm) induirait le même effet dans la chaussée que le train d'atterrissage étudié. Pour les couches supérieures, la RSE est égale à la charge à la roue. Pour les couches inférieures en revanche, du fait de l'interaction entre roues, la RSE est supérieure à la charge à la roue.

On partira du postulat que le chargement HWD le plus représentatif du passage d'un avion (en termes d'effort maximal) correspond à la charge à la roue, pour deux raisons :

• Il est impossible de trouver une charge qui soit satisfaisante aussi bien pour les couches de surface que pour les couches profondes,

▶ Le calcul de la RSE au niveau des couches profondes (sommet du sol support de la chaussée par exemple) nécessite une connaissance *a priori* des propriétés de la chaussée, qui sont les inconnues à déterminer lors de l'essai HWD.

La charge à la roue de l'avion dimensionnant est donc retenue en première approximation comme charge de référence. Ceci nécessite la connaissance du trafic accueilli par la chaussée étudiée.

Il est en outre souhaitable de tester la potentielle non-linéarité vis-à-vis de l'effort appliqué via la réalisation d'essais multi-hauteurs de chute (voir 5.1.3.).

Remarque: il est dans certains cas possible d'identifier plusieurs avions de référence pour une même plateforme, en fonction de l'aire auscultée (par exemple une plateforme qui accueillerait des aéronefs de code E selon le code de référence d'aérodrome de l'OACI et dont l'utilisation d'une des aires de stationnement serait restreinte aux aéronefs de code C).

2.3.3. Relation Δt_F /Vitesse des avions

La relation entre le temps d'impulsion Δt_F du signal HWD, appliqué à la surface de la chaussée, et les pseudo-fréquences « ressenties » ($1/\Delta t$) par les matériaux de chaussée est sensiblement indépendante de la profondeur. La Figure 5 et le Tableau 3 présentent les résultats de calculs dynamiques réalisés à l'aide du logiciel PREDIWARE [PREDIWARE, 2013] du STAC, sur la structure de la chaussée instrumentée.



Figure 5: F (t) [kN] vs ε_i (t) [μ m/m], sous la charge.

La relation retenue entre la vitesse de passage d'une roue V et la pseudo-fréquence $f = 1/\Delta t$ est:

$$V = \lambda \times f$$

(Eq. 1)

avec λ la largeur du « bassin de déformation » considéré (Figure 6).

Signal	∆t _i [ms]	f [Hz]
Effort F (t)	29,75	33,6
Déflexion d (t)	37	27
Déformations de tractions horizontales longitudinales et transversales à la base du BB \mathcal{E}_{XX_BB} (t) = \mathcal{E}_{YY_BB} (t)	26	38,5
Déformations de tractions horizontales longitudinales et transversales à la base de la GB $\mathcal{E}_{XX_GB}(t) = \mathcal{E}_{YY_GB}(t)$	31,75	31,5
Déformation verticale de contraction au sommet de la GNT \mathcal{E}_{ZZ_GNT} (t)	29,75	33,6
Déformation verticale de contraction au sommet du sol $\mathcal{E}_{ZZ_Sol}(t)$	33	30,3

Tableau 3: Évolution de la pseudo-fréquence ressentie par les matériaux en fonction de la profondeur, pour l'exemple traité en Figure 5.

Le tableau 3 montre que les Δt_i relatifs à chacune des déformations sont voisins de Δt_F . Δt_F est donc considéré en première approximation pour la suite des calculs.

Remarque : l'ensemble des temps d'impulsion du Tableau 3 ont été déterminés en utilisant la règle des 5 % retenue pour l'effort appliqué.



Figure 6: Relation entre Δt et la vitesse de passage d'une roue.

 λ augmente avec la profondeur (phénomène de diffusion); on considère, pour la relation V vs f, la déformation longitudinale à la base des matériaux bitumineux: $\mathcal{E}_{XX (bas GB)}$, car il s'agit en général de la déformation « dimensionnante » pour la couche de matériaux bitumineux

Des calculs menés sur l'exemple de la planche d'essais instrumentée du STAC permettent d'obtenir $\lambda/2 \approx 1.5 m$. Cette valeur a été confirmée par une campagne d'essais au HWD réalisée en novembre 2011 sur cette même planche instrumentée (Figure 7).



Figure 7: Bassins de déformation $\mathcal{E}_{XX \ (bas \ GB)}$ numérique et expérimental.

Le Tableau 4 fournit les temps d'impulsion Δt représentatifs de plusieurs vitesses d'avion :

Temps d'impulsion du signal d'effort HWD [ms]	Vitesse de la roue [km/h]
540	20
150	70
105	100
33	330

Tableau 4: Exemples numériques de relations Δt vs $v=\lambda f$.

Remarque: ces valeurs constituent un ordre de grandeur pour une chaussée aéronautique gros porteurs. En effet, la relation est fonction de l'épaisseur de la structure, et de la température de chaussée (10 °C pour l'essai de novembre 2011 considéré).

2.3.4. Pression sous la plaque de chargement

La valeur maximale de pression appliquée dépend de la valeur de F_{max} et du diamètre de la plaque de chargement.

L'objectif est d'appliquer une pression du même ordre de grandeur que la pression de contact des pneumatiques, de manière à imposer une sollicitation représentative du trafic simulé, et s'assurer par la même occasion de rester dans une gamme de pression raisonnable, c'est-à-dire 1- qui évite d'endommager la chaussée par poinçonnement, et 2- qui permette de limiter le phénomène de fluage et ainsi de solliciter de manière optimale l'ensemble de la structure de chaussée.

L'intensité des chargements aéronautiques impose donc l'utilisation systématique d'une plaque d'essais de « grand » diamètre: 45 cm. Avec une telle surface de contact, un effort appliqué de 300 kN (30 tonnes) correspond à une pression de 1,89 MPa (18,9 bars), du même ordre de grandeur que la catégorie moyenne de pression des pneumatiques (code lettre X du PCN), passée depuis juillet 2013 de 15 à 17,5 bars. Le même effort, appliqué sur une plaque d'essais de « petit » diamètre (30 cm) engendrerait à la surface des matériaux bitumineux une pression de l'ordre de 42,5 bars.

Il est en outre préconisé d'utiliser une plaque segmentée (Photo 4) afin d'obtenir une répartition de pression la plus uniforme possible sous la plaque.

Remarque : la présence d'un tapis en caoutchouc crénelé (Photo 4) sous la plaque contribue aussi à répartir la pression sous cette dernière.



Photo 4: Vue de dessous de la plaque de chargement segmentée.

2.4. Principe du calcul inverse

L'exploitation des essais HWD repose sur la méthode dite de « calcul inverse » qui consiste à identifier, après avoir choisi un modèle mécanique pour la chaussée, les paramètres de ce modèle par comparaison des résultats numériques et expérimentaux.

2.4.1. Méthodes usuelles (« pseudo-statiques »)

Les méthodes courantes utilisent le modèle de Burmister [Burmister, 1943] ou le modèle de l'épaisseur équivalente [Ullidtz, 1987]. Ces modèles permettent de décrire la déformation d'une chaussée multicouche linéaire élastique sous chargement de plaque statique. Les modules d'Young de chaque couche sont ensuite identifiés à l'aide d'un calcul inverse impliquant un bassin de déflexion « pseudo-statique », reconstitué à partir des *maxima* enregistrés sur les différents géophones (Figure 8), même si ces derniers sont atteints à des instants distincts.



Figure 8: Reconstitution d'un bassin de déflexion; méthode pseudo-statique.

Ces méthodes présentent deux grands défauts :

- la modélisation du chargement est très éloignée de la réalité physique (sollicitation statique plutôt qu'impulsion dynamique),
- > seule une infime partie de l'information est exploitée.

Le deuxième constat implique pour la phase d'identification numérique (voir 6.3) la résolution d'un système d'équations faiblement voire pas du tout (en fonction du nombre de couches de la structure) surdéterminé. La robustesse du processus d'identification dans le cas de l'emploi de la méthode pseudostatique est par conséquent très faible, comme démontré dans [Broutin, 2010].

2.4.2. Méthode préconisée par le STAC (« méthode dynamique »)

Ce document préconise une méthode permettant de simuler la réponse de la chaussée sous chargement dynamique et une phase de calcul inverse prenant en compte l'ensemble des historiques de déflexion.

Le calcul inverse se formule dès lors ainsi:

Minimiser la fonction objective $f_t(\vec{E})$

$$f_{t}(\vec{E}) = \sum_{k=1}^{m} q_{k} \int_{t=t \min}^{t \max} (w_{k}(\vec{E}, \vec{H}, \vec{v}, r_{k}, p, a, t) - d_{k}(t))^{2} dt$$

$$\approx \delta t \times \sum_{st=st\min}^{st\max} \sum_{k=1}^{m} q_k \left(w_k \left(\vec{E}, \vec{H}, r_k, p, a, st \right) - d_k \left(st \right) \right)^2$$
(Eq. 2)

avec:

- st les pas de temps considérés pour le calcul inverse,
- ▶ *st_{min}* et *st_{max}* les bornes temporelles de l'intervalle de minimisation choisi,
- d_k la déflexion mesurée à l'instant t, ou au pas de temps st, par le k^{eme} des m géophones de mesure,
- w_k la déflexion théorique correspondante, calculée à l'instant t, ou au pas de temps st,
- les q_k des coefficients de pondération, par défaut choisis tous égaux à 1,

▶ \vec{E} , \vec{H} des vecteurs colonnes dont les composantes sont respectivement les valeurs des différents paramètres mécaniques (modules d'Young, coefficients de Poisson, amortissement, paramètres du modèle d'interfaces⁴ si modèle plus évolué que le simple collage parfait, paramètres viscoélastiques pour les couches de matériaux bitumineux⁵...), et des épaisseurs H_i des n_C couches de la structure,

- ▶ *r*_k la distance du géophone au point d'application de la charge,
- > p et a respectivement la pression et le rayon de la plaque de chargement,
- $\bullet \delta t$ le pas d'échantillonnage retenu.

Remarque: δt ne correspond pas nécessairement au pas d'échantillonnage de l'acquisition réalisée δt_{acq} . La fréquence d'échantillonnage pour l'ensemble des capteurs – effort + géophones – est classiquement de 4 kHz, i.e. $\delta t_{acq} = 0,25 \text{ ms}$ ce qui est très fin par rapport au phénomène observé. Dans la pratique (voir 6.1.2), il peut s'avérer

pertinent, pour limiter les temps de calcul, d'optimiser δt en ne considérant qu'un pas de temps sur N ($N \in \mathbb{N}$), *i.e.* de retenir $\delta t = N \times \delta t_{aca}$.

En plus de proposer une modélisation plus proche de la réalité physique de l'essai que les méthodes pseudo-statiques courantes qui ne considèrent que l'effort maximal appliqué et les déflexions maximales engendrées, cette méthode permet la mise en œuvre de calculs inverses plus robustes et/ou de l'identification d'un plus grand nombre de paramètres.

Dans la pratique, p, a et les r_k sont connus; les coefficients de Poisson, dont l'influence est limitée, sont choisis arbitrairement dans la gamme de variation relative à chaque matériau constitutif (0,25 pour l'acier de la plaque de chargement, 0,3 pour les matériaux bitumineux, et 0,35 pour les matériaux granulaires et le sol support); les épaisseurs des couches sont évaluées par une méthode externe (voir 3.1.3) exceptée celle du sol support, qui repose sur un substratum rigide dont la profondeur sera déterminée dans une phase d'analyse préliminaire des résultats HWD (voir 6.2).

⁴ Traitement des interfaces limité dans la version actuelle aux deux cas de figure : interfaces parfaitement collées, et interfaces décollées ; la pertinence d'intégrer des modèles plus évolués et la difficulté technique d'intégrer ces nouveaux paramètres dans la phase de rétrocalcul sont à l'étude.

⁵ Non pris en compte dans la méthode proposée; ce type de modélisation pour les matériaux bitumineux sera intégré s'il s'avère présenter une influence non négligeable sur le comportement de la chaussée sous chargement dynamique; étude en cours.

2.5. Corrections en température/fréquence

Les modules d'Young rétrocalculés à l'issue de la phase de calcul inverse sont liés aux conditions de l'essai HWD, en termes de températures (mesurées dans la chaussée pendant l'essai) et de fréquence $(1/\Delta t)$.

Du fait de la susceptibilité des matériaux bitumineux à ces paramètres, ils devront être corrigés en température (introduction de données climatiques) et en fréquence (prise en compte des vitesses des aéronefs sur les différentes aires de mouvement) pour les phases d'exploitation ultérieures (calculs de portance ou de durée de vie résiduelle).

Deux méthodes équivalentes de prise en compte de la température sont possibles : 1- l'intégration de diagrammes de températures, ou 2- la prise en compte d'une température équivalente (qui a été calculée en amont à l'aide de ces mêmes diagrammes, ou à défaut de données précises choisies égales à 15 °C en France métropolitaine et à 28 °C en outremer).

Ces corrections nécessitent la connaissance des courbes maîtresses des matériaux considérés, issus d'essais en laboratoire. À défaut, la correction en fréquence s'appuie sur des données de matériaux « standard », tandis que la méthode LTPP [LTPP, 2000], qui propose une correction linéaire dans un repère semi-logarithmique [T°C, log (E)], de pente comprise entre -0,0195 et -0,021 est utilisée pour la correction en température.

Remarque: il est primordial de minimiser les variations de température dans la chaussée au sein d'une même série de mesures. Il est donc préconisé de réaliser les campagnes d'essais durant la période où la température dans la chaussée est la plus stable, c'est-à-dire de nuit.



Photo 5: Le HWD du STAC lors d'une expertise sur plateforme civile, de nuit.

3. Pré-requis

3.1. À l'auscultation

3.1.1. Précisions attendues et étalonnage des appareils de mesure

a) Précisions des appareils

La précision requise pour les mesures de température, sur la gamme 0 °C - 50 °C est de 1 °C.

Les précisions exigées pour le HWD sont de :

	Résolution	Précision
Mesure d'effort	0,1 kN ou mieux	2 % ou mieux
Mesure de déflexion	1 μm ou mieux	2 % ou mieux

Tableau 5: Précisions requises pour les essais HWD.

b) Étalonnage des appareils

Il est préconisé que l'utilisateur vérifie annuellement son matériel (HWD et chaîne de mesure des températures), et le fasse réétalonner en cas de dérive supérieure aux tolérances susmentionnées.

Le STAC met à disposition sur demande, sur son site de Bonneuil, un banc de contrôle de matériels d'auscultation permettant la vérification *in situ*:

- de mesures d'efforts, statiques ou dynamiques,
- de mesures de déflexions.
- Vérifications de mesures d'effort.

Elles sont réalisées à l'aide d'un système de pesage dynamique de précision, élaboré par le STAC, constitué d'éléments métalliques en aciers spéciaux, dimensionnés spécialement pour recevoir des chocs dynamiques allant jusqu'à 60 tonnes.

Ce système est encastré dans un massif de réaction en béton armé (Photo 6).

La fréquence d'acquisition est réglable jusqu'à 4 800 Hz.



Photo 6: Système de pesage encastré du STAC en configuration essais.

Remarque: pour un chargement HWD de temps d'impulsion d'environ 30 ms, la pseudo-fréquence est voisine de 30 Hz; il convient donc de réaliser les essais à une fréquence minimale de 30×10 = 300 Hz; cette condition est ici vérifiée.

La précision de la mesure du système de pesage dynamique du STAC est de 3 kg (0,03 kN) sous un chargement dynamique de 30 tonnes (300 kN).

Le système fait l'objet d'un étalonnage annuel DKD (Deutscher KalibrierDienst).

Un exemple de résultats d'essais est donné sur les Figures 9 à 11 suivantes. Il s'agit de la vérification de l'effort HWD lors d'un essai constitué d'une chute de préchargement et de 3 chutes de mesure.

L'effort mesuré par le capteur du HWD est représenté en rouge; celui donné par le système de mesure en violet.



Figure 9: Exemple de vérification du capteur d'effort du HWD – vue d'ensemble.



Figure 10: Exemple de vérification du capteur d'effort du HWD – détail de la chute 1.

Remarque: le début de l'enregistrement (Figure 10) montre le chargement statique appliqué par le pied du HWD (de l'ordre de 10 kN) lorsque ce dernier est posé sur le système.



Figure 11 : Exemple de vérification du capteur d'effort du HWD – détail du rebond principal de la chute 1.

Remarque: les écarts constatés entre les deux signaux (retard du signal enregistré par le système de pesage et valeur maximale plus faible) s'expliquent en partie par la présence du tapis de caoutchouc crénelé collé sous la plaque de chargement.



Photo 7: Vérification des mesures d'effort délivrées par des HWD sur le système de pesage du STAC, essais réalisés dans le cadre de la campagne d'essais croisés internationaux d'octobre 2013.

Vérifications de mesures de déflexion

Deux dispositifs dits « ancrages profonds » permettent de mesurer le déplacement de la surface de la chaussée par rapport à une référence fixe, ancrée dans le substratum du site (à -12 m par rapport à la surface de la chaussée).

Les Figures 12 et 13 présentent l'utilisation d'un ancrage profond pour vérifier la réponse d'un géophone du HWD du STAC (géophone 2 sur cet exemple). L'essai présenté est extrait de la campagne de faisabilité réalisée en 2010 pour tester les ancrages.

La plaque du HWD est positionnée de sorte que la pointe du géophone à vérifier soit placée sur la tête d'ancrage. Un essai comprenant trois chutes est alors réalisé.



Photo 8: Tête d'ancrage d'un ancrage profond de la planche instrumentée souple du STAC.

La Figure 12, qui présente le signal de déflexion enregistré par le capteur de la tête d'ancrage, permet de visualiser la mise en place de la plaque ainsi que l'enregistrement des trois chutes, chacune caractérisée par plusieurs rebonds. Le premier rebond de la première chute est isolé sur la Figure 13, et le signal, préalablement taré, est comparé à celui délivré par le géophone.





Remarque : la Figure 12 permet d'observer, superposé à la déformation élastique sous chargement rapide, un fluage de la chaussée sous chargement statique qui intervient dès que le pied du HWD est posé à la surface de cette dernière.



Figure 13: Vérification des données de déflexion du HWD à l'aide d'un ancrage profond – comparaison des signaux; rebond principal.

La fréquence d'acquisition est réglable jusqu'à 2 400 Hz.

L'incertitude de mesure du système est de 0,5 % ou 5 μm .

Remarque: l'écart élevé constaté sur la Figure 13 (valeur maximale de déflexion fournie par l'ancrage inférieure d'environ 6 % par rapport à celle mesurée par le géophone) provient du fait que la centrale d'acquisition initialement utilisée pour recueillir le signal de l'ancrage imposait un filtre passe-bas de fréquence de coupure maximale 200 Hz, alors qu'une fréquence de coupure d'au moins 300 Hz est préconisée au vu du spectre fréquentiel présenté sur la Figure 4. Ce problème a depuis été résolu par l'achat d'une nouvelle centrale permettant un réglage de la fréquence de coupure jusqu'à 4800 Hz.

C- Essais croisés

En complément de ces vérifications matérielles, le STAC a initié en octobre 2013 une campagne d'essais croisés internationale sur son site de Bonneuil-sur-Marne (Photo 9), destinée à devenir bisannuelle.

Même si ce type d'essais croisés ne peut se substituer à l'étalonnage du matériel (la manifestation prévoit d'ailleurs une journée de vérification du matériel à l'aide du système de pesage et des ancrages profonds, comme présenté ci-dessus) ils permettent à chaque participant de juger de la justesse des mesures délivrées par son appareil.



Photo 9: HWDs sur la planche instrumentée du STAC, lors de la campagne d'essais croisés internationaux d'octobre 2013.

3.1.2. Données relatives à l'infrastructure

a) Plans détaillés de la plateforme étudiée

Ces derniers sont nécessaires pour définir le nombre de points d'essais à réaliser, et les localiser précisément en amont, afin d'évaluer la durée prévisionnelle de la campagne d'essais.

Remarque: ces plans serviront aussi au projeteur, en phase d'exploitation, pour repérer les zones homogènes.

b) Données de trafic et de cheminement

Ces données servent à déterminer :

- l'avion dimensionnant relatif à chaque aire auscultée,
- un effort cible à appliquer sur la chaussée, en cohérence avec les chargements réellement reçus par la structure,

• les parties de la structure les plus sollicitées, à partir des stationnements et cheminements privilégiés des aéronefs, et de la configuration des trains d'atterrissage.

c) Connaissance des structures de chaussée

Cette dernière est nécessaire afin de délimiter sur chaque aire de mouvement les zones structurellement homogènes. Cette cartographie affectera directement la distribution des points d'essais à réaliser.

Elle repose sur une connaissance fine de l'historique des chaussées ou sur les résultats d'une étude préliminaire. Ainsi, le STAC préconise en cas d'historique lacunaire, ou dont la fiabilité s'avère insuffisante, la réalisation d'une campagne de géoradar multitête (antenne de 1,5 ou 2 GHz permettant la détection des interfaces entre matériaux bitumineux, et antenne de 0,9 ou 1 Ghz permettant de pénétrer jusqu'au sommet du sol support), calée à l'aide de quelques carottages (utilisés comme références pour ajuster précisément les épaisseurs de couches issues des essais radar). Deux bandes d'auscultation radar sont préconisées sur piste ou voie de circulation, de part et d'autre de l'axe, la distance à l'axe devant être optimisée en fonction du trafic reçu par la chaussée (essais implantés sur les parties les plus sollicitées; informations issues de b-); les essais sur parkings se feront en fonction des stationnements et cheminements privilgégiés.

Une campagne complémentaire de carottages, plus conséquente que la première, sera menée après prétraitement des données radar et HWD (voir 5.2.1), le but étant de réaliser *a minima* un carottage par zone homogène identifiée afin d'obtenir, pour l'interprétation des essais HWD (voir 6), une connaissance la plus précise possible de la structure.

Remarque: les carottages et mesures radar sont également une source d'informations sur:

▶ le collage des interfaces, paramètre très influant sur les résultats du calcul inverse,

> l'état d'endommagement des matériaux afin de consolider les enseignements de la phase de calcul inverse.

d) Dernier Indice de Service

L'évaluation visuelle de la chaussée à l'aide de la méthode Indice de Service (IS) [STAC, 2001] fournit des informations sur les états superficiels et structurels de la structure étudiée. Réalisée régulièrement, elle permet de suivre l'évolution structurelle de la chaussée au cours du temps. Les sections anormalement dégradées ou présentant une évolution rapide des dégradations sont repérées. La décision pourra être prise de condenser les essais HWD au droit de ces zones.

3.1.3. Existence d'un protocole d'utilisation

Il est préconisé que chaque prestataire amené à réaliser des essais HWD ait procédé en amont à la rédaction d'un protocole d'utilisation de son matériel.

3.2. À l'interprétation des résultats

Afin de vérifier la cohérence des résultats obtenus par calcul inverse, les essais suivants pourront être réalisés:

- essais de modules complexes sur les matériaux bitumineux [AFNOR, 2004a],
- essais triaxiaux [AFNOR, 2004b] ou à la colonne résonnante [ASTM] sur les matériaux granulaires et le sol support.

La réalisation d'une étude granulométrique des matériaux non traités et du sol support ainsi que des essais VBS (respectivement [AFNOR, 2010] et [GTR] pour les matériaux non traités et le sol) pourront aussi être une source d'information intéressante, notamment pour expliquer d'éventuelles pertes de portance.

Par ailleurs, l'exploitation des paramètres rétrocalculés (étapes 2 et 3 introduites en 1.1, non traitées dans ce guide) pourra nécessiter entre autres la réalisation des essais supplémentaires suivants :

• des essais de modules complexes sur matériaux bitumineux pour fiabiliser les corrections en fréquence/température pour la phase de calcul des déformations critiques,

▶ des essais de fatigue sur les matériaux bitumineux [AFNOR, 2007a] et des essais triaxiaux répétés sur les matériaux granulaires et le sol support [AFNOR, 2004b] pour préciser les performances des matériaux vis-à-vis de l'endommagement.

4. Méthodologie d'auscultation

4.1. Conditions d'essais

4.1.1. Gamme de températures

Il est recommandé que la température au milieu des matériaux bitumineux (i.e. à mi-profondeur de l'épaisseur de matériaux bitumineux identifiée) lors des essais se situe dans la gamme [5 °C - 40 °C]. D'où la nécessité d'éviter la réalisation d'auscultations dans certaines régions en janvier - février ou juillet-août, les plannings annuels des campagnes d'essais devant être adaptées en conséquence.

La température minimale de 5 °C est préconisée afin de ne pas risquer d'endommager les matériaux bitumineux sous l'effet du chargement impulsionnel, tandis que la température maximale de 40 °C permet d'une part de réduire les risques de poinçonnement, et d'autre part de limiter le comportement viscoélastique des matériaux bitumineux, et donc de garantir la validité du modèle multicouche linéaire élastique utilisé pour l'exploitation des résultats.

4.1.2. Réalisation d'essais à température constante

Comme expliqué en 2.5, les essais devront être réalisés à température « constante » pour chaque aire de mouvement auscultée. Une variation d'au maximum 3 °C de la température au milieu des matériaux bitumineux est recommandée.

Il est donc préconisé de réaliser les auscultations systématiquement de nuit.

4.1.3. Suivi de la température

Un suivi durant les essais de la température dans la couche de matériaux bitumineux est requis, afin de s'assurer que les deux conditions en 4.1.1 et 4.1.2 sont vérifiées.

Le suivi devra être réalisé en un point représentatif de la structure de référence (voir les épaisseurs obtenues à partir du carottage en 3.1.3) de la zone homogène la plus étendue de l'aire auscultée, sur un profil comprenant a minima trois capteurs, placés aux profondeurs correspondant au sommet⁶, au milieu, et à la base de la couche de matériaux bitumineux⁷.

Remarque: la connaissance précise des profils de températures dans ces matériaux permettra en outre, en phase d'exploitation des résultats, de réaliser les ajustements nécessaires pour le calcul direct (étape 2, non traitée dans le guide).

4.2. Établissement du plan d'essais

4.2.1. Piste ou voie de circulation

Ce paragraphe présente la méthode d'implantation des points d'essais utilisée. Le maillage pourra être adapté (i.e. resserré) en cas de forte hétérogénéité de l'aire étudiée, ou de mise en évidence par le dernier rapport d'IS de zones dégradées ou évoluant de manière anormale.

Les essais sont réalisés selon deux lignes parallèles à l'axe de la chaussée, situées de part et d'autre de ce dernier.

⁶ Dans la pratique à 3 cm de la surface.

⁷ Dans la pratique à 1,5 cm au dessus de la couche de fondation, pour s'assurer que le trou ne communique pas avec la couche de fondation.

a) Espacement entre les points d'essai sur une ligne

Un espacement de 50 m entre les points d'une même ligne d'essais est retenu pour une section homogène. Cet espacement pourra être réduit afin de respecter un minimum de cinq (5) points d'essais par zone homogène.

L'implantation des points pourra se faire à l'aide du mesureur de distance automatique (DMI) intégré à l'appareil, si ce dernier en est équipé.

b) Distance à l'axe

La distance à l'axe est choisie afin de tester la partie la plus sollicitée par le trafic (voir 3.1.2). En l'absence de consignes spécifiques (issues par exemple de l'analyse du rapport IS), la distance à l'axe de la piste ou de la voie de circulation sera choisie égale à la moitié de la voie de l'avion dimensionnant (train d'atterrissage dimensionnant).

Si un défaut de surface étendu longitudinalement pouvant induire un mauvais contact entre la surface de la chaussée et la plaque de chargement (typiquement de l'orniérage) et donc incompatible avec la bonne réalisation des essais HWD a été détecté, cette distance à l'axe sera adaptée (augmentation de 50 cm par exemple). En cas de défaut ponctuel, le point d'essai sera en revanche avancé d'un ou deux mètres le long de l'axe, en conservant la distance par rapport à ce dernier. Ces modifications devront impérativement être précisées dans le rapport d'essai.

c) Numérotation

Une numérotation conventionnelle des points d'essais est ici proposée.

Auscultation d'une piste

Le premier point (chaînage 0) est conventionnellement placé en extrémité de piste (i.e. début du seuil si seuil souple, fin du seuil si seuil rigide⁸), côté QFU le plus faible, à droite de l'axe de la piste. Les points suivants sont espacés de 50 m. (Figure 14-a). Arrivé au dernier point de mesure, le DMI est arrêté (valeur du dernier chaînage gardée en mémoire), le HWD est placé de l'autre côté de l'axe, à la même abscisse que le dernier point réalisé, en sens inverse. Le DMI est réactivé et l'option « sens de déplacement inverse » cochée. L'appareil est avancé (Figure 14-b) ou reculé (Figure 14-c) de 25 m afin de réaliser le premier point d'essai sur la « ligne de gauche ». Les points suivants sont réalisés tous les 50 m.

Cette procédure permet d'obtenir une distribution des points en quinconce par rapport à l'axe, avec un espacement moyen (les deux lignes confondues) entre points de 25 m. L'ensemble des points est repéré à partir du seuil de QFU le plus faible.

Remarque: sur la base de cette valeur par défaut de 50 m d'espacement par ligne entre les points, l'auscultation complète d'une piste de 3000 m nécessite, à raison de 3 à 5 minutes par point de mesure, 6 à 10 heures d'essais.





Figure 14: Emplacement des points de mesures sur piste.

⁸ Dans ce cas, le premier point est placé entre 2 m et 3 m à l'intérieur de la portion souple, afin d'éviter la zone de transition rigide/souple.
Auscultation d'une voie de circulation

Le même raisonnement est suivi pour l'auscultation des voies de circulation (Figure 15); dans le cas d'une voie de circulation parallèle l'origine est choisie côté QFU le plus faible, et dans le cas d'une voie de circulation perpendiculaire, côté piste principale.



Figure 15: Emplacement des points de mesures sur piste et voies de circulation.

Remarque : en cas de structures très différentes entre les différentes aires de mouvement, les essais seront réalisés à 2 ou 3 m de la jonction, afin d'éviter les effets de bord.

d) Renseignement du plan

Les points d'essais réalisés seront reportés au fur et à mesure de la campagne sur le plan de la plateforme.

4.2.2. Parking

Un plan d'implantation précis doit être établi avant la réalisation des essais. La densité des points d'essais est, sauf raisons particulières, de l'ordre d'un point d'essais pour 500 m². Les points seront concentrés au droit des cheminements principaux, selon deux lignes de part et d'autre des axes de ces derniers, comme dans le cas des pistes ou des voies de circulation.

4.3. Opérations préalables aux essais

4.3.1. Mise en place de la centrale de température

Le suivi de la température dans la couche de matériaux bitumineux sera réalisé à l'aide d'une centrale d'acquisition portative (Photo 10).

La première étape consiste à percer (foret de 10 mm), au moins 30 minutes avant le début des essais⁹, des trous en bord de chaussée, i.e. par défaut à 50 cm du marquage latéral (Figure 16), en veillant à rester à l'intérieur de la structure de référence¹⁰ et distants entre eux d'un (1) mètre environ, à des profondeurs correspondant aux profondeurs définies dans 4.1.3 augmentées d'1,5 cm, exceptée celle à la base, i.e. pour le profil *a minima*, perçages :



Photo 10: La centrale portative de température du STAC.

- ▶ jusqu'à 4,5 cm, de la surface,
- jusqu'au milieu de la couche de matériaux bitumineux + 1,5 cm,
- jusqu'à 1,5 cm de l'interface couche de base en matériaux bitumineux/couche de fondation en matériaux non traités.

Les trois (3) derniers centimètres de chaque trou (ce qui correspond à un volume d'environ 2 ml) sont remplis d'un mélange eau-glycérine (un volume de glycérine pour deux volumes d'eau). Le sommet des trous est isolé (Photo 11) à l'aide d'une pâte prévue à cet effet (compound).



Marquage latéral
Capteur de température
Centrale
50 cm
Accotement

Photo 11: Mise en place des capteurs de température dans la chaussée.

Figure 16: Mise en place de la centrale de température.

Avant lancement des essais sur chaque nouvelle aire, la pâte est enlevée, les capteurs de température mis en place, une nouvelle pâte remise en place pour combler l'interstice restant. L'acquisition des températures peut alors être lancée. Il est préconisé d'activer la fonction « mode veille » de la centrale, avec réalisation d'une mesure simultanée sur l'ensemble des capteurs toutes les dix minutes.

La centrale reste en place durant l'auscultation de l'ensemble de l'aire étudiée. Il est conseillé de placer la centrale dans un boîtier étanche, fixé à la chaussée à l'aide d'un tirefond.

Remarque : une attention particulière sera portée en fin d'auscultation au rebouchage des trous (à l'aide d'un coulis de ciment par exemple).

¹⁰ Se méfier notamment des cas particuliers de pistes de structure non homogènes transversalement, typiquement les pistes élargies, ou celles dont la partie centrale uniquement aurait été refaite.

⁹ Une étude STAC a démontré qu'il s'agit du temps de stabilisation nécessaire au « retour à la normale » de la température après échauffement de la chaussée dû au perçage des trous.

4.3.2. Vérification du mesureur de distance automatisé

Le mesureur de distance automatisé (DMI) intégré au matériel est utilisé pour implanter les points d'essais.

Sa précision doit être vérifiée avant le lancement des essais, en utilisant une distance parfaitement connue (longueur de la piste par exemple) comme référence. En cas de dérive significative, un réétalonnage doit être effectué, conformément à la procédure interne dédiée.

La vérification doit être réalisée à une vitesse inférieure à 30 km/h.

4.3.3. Préchauffe du matériel

Des essais de préchauffe du matériel sont requis avant toute campagne d'essais. Vingt (20) chutes depuis la hauteur H_1 (voir 4.4 ci-après), en dehors des points d'essais exploités, doivent être réalisées.

Ceci permet de faire chauffer l'électronique et le système d'amortissement.

4.4. Choix d'une séquence de chutes type

Une séquence de chutes est constituée d'une ou plusieurs séries de tests, chacune composée de n_i chutes de la hauteur H_i . Le nombre S de séries sera de préférence choisi différent de 1 afin d'étudier la linéarité du comportement de la chaussée vis-à-vis de l'effort appliqué. Le choix de n_i différents de 1, permet de vérifier la répétabilité du test, et augmente la fiabilité de l'essai (élimination de toute valeur aberrante au sein des n_i chutes d'une même série).

Par ailleurs une chute de pré-chargement H_0 (dont la valeur est définie en 4.4.3), assurant une parfaite mise en place de la plaque et des géophones à la surface de la chaussée, est systématiquement réalisée.

La séquence de chutes type à réaliser est donc :

$$\Sigma = H_0 + \sum_{i=1}^{S} n_i \times H_i$$

Le nombre de chutes correspondant est pour chaque essai:

$$1 + \sum_{i=1}^{S} n_i$$

Il est préconisé de choisir $n_i \ge 3$ et $S \ge 2$.

Exemple: S = 2, $H_0 = H_1 = 400$ mm, $H_2 = 100$ mm, $n_1 = n_2 = 3$

Dans ce cas, chaque essai comporte une chute de pré-chargement de la hauteur 400 mm, suivie de 3 chutes de la hauteur 400 mm et 3 chutes de la hauteur 100 mm.

4.4.1. Configuration d'essais

Différents paramètres matériels influent sur la charge d'essai. Il s'agit de la masse statique M_0 laissée tomber, de sa hauteur de chute H_0 , du système d'amortissement (tampons en caoutchouc, de rigidité surfacique apparente k), et de la chaussée.

Le dernier élément est imposé. Les trois autres sont des paramètres de l'essai, ajustables. Leur influence relative peut être résumée ainsi:

- une augmentation de M_0 induit une augmentation de F_{max} et de Δt ,
- une augmentation de H_0 induit une augmentation de F_{max} et une diminution de Δt ,
- une augmentation de k induit une augmentation de F_{max} et une diminution de Δt .

En pratique, le remplacement du système de tampons est fastidieux et n'a qu'une influence négligeable sur la valeur de Δt , compris entre 30 et 40 ms quelle que soit la structure et le jeu de tampons utilisé. Ce temps d'impulsion est idéal (voir 2.3.3) pour simuler le passage d'une roue d'avion sur piste. En revanche, il est trop faible pour les mesures sur voies de circulation ou zones de parking. Une réflexion est menée afin de trouver des systèmes d'amortissement réglables qui permettraient de couvrir l'ensemble de la gamme requise.

Le changement des masses est lui aussi fastidieux. Il est préconisé de réaliser les essais systématiquement avec la masse maximale (720 kg), d'une part car cette masse est nécessaire dans la plupart des expertises sur chaussée gros porteurs pour atteindre le chargement dynamique cible, et d'autre part car une diminution de la masse entraînerait encore une diminution de Δt .

Il est donc préconisé de réaliser les essais avec la configuration par défaut suivante :

- ▶ *M*₀ = 720 kg,
- > Système de tampons durs (dureté SHORE 75),
- Plaque articulée, Ø 45 cm.

Ainsi, seule la hauteur de chute sera modifiée lors des essais. Elle sera adaptée au cours de la campagne d'essais afin d'atteindre la charge cible.

Remarque: pour le HWD du STAC, la hauteur de chute est variable entre H_{min} = 40 mm et H_{max} = 420 mm, ce qui correspond à une gamme d'effort dynamique approximative (car dépendante de la chaussée étudiée) de 65 kN à 300 kN.

4.4.2. Choix d'une chute de référence

Une hauteur de chute de référence H_1 doit être définie. Elle sera déterminée par calage inverse afin :

- soit de correspondre à la charge cible $F_{Réf}$ définie en amont de l'auscultation par le chargé d'études (généralement la charge à la roue de l'avion dimensionnant; voir 2.3.2.),
- ▶ soit, en l'absence de charge cible, d'engendrer une déflexion cible $d_{IR\acute{e}f}$ sur le géophone central (G_I).

Le logigramme fourni en annexe récapitule l'ensemble des développements qui suivent.

a) Cas où une charge cible a été communiquée

La hauteur H_1 est déterminée par calage (méthode de dichotomie) de la hauteur de chute, afin d'atteindre la valeur de charge cible $F_{Réf}$ avec une tolérance de $\pm 10 \ kN$ ($\pm 1 \ tonne$).

Remarque: afin de ne pas endommager la piste, il convient de commencer le calage par H_{min} (obtention d'un effort F_{0}), et d'utiliser pour la seconde chute l'approximation suivante:

$$H = H_{\min} \times (F_{cible}/F_0)^2$$

(Eq. 3)

Les chutes de calage (qui ne seront pas exploitées) doivent être réalisées dans la zone d'étude, en dehors des futurs points d'essais (à une distance supérieure à deux (2) mètres).

Remarque 1: il sera aussi vérifié que la valeur de déflexion mesurée par d_1 n'est pas trop élevée (> 1500 µm). Si c'est le cas, cela signifie que la chaussée étudiée présente un problème structurel. La campagne d'essais devra cibler une déflexion plus faible afin de ne pas l'endommager davantage. La valeur de 700 µm est choisie par défaut. Se référer au paragraphe suivant.

Remarque 2: cette phase ne comporte pas de chute de préchargement (désactivation de H_0 *dans le logiciel d'acquisition).*

Il sera vérifié que la valeur d'effort F_1 enregistrée sur le premier point d'essais est bien dans l'intervalle de tolérance $F_{R\acute{e}f} \pm 10 \ kN$.

• Si cela n'est pas le cas, cela peut signifier que le point sur lequel le calage a été réalisé est un point singulier; dans ce cas changer de point et recommencer.

• Si F_1 est bien dans l'intervalle, cette valeur est enregistrée et servira de témoin pour la suite de l'auscultation.

Ainsi, la valeur d'effort mesurée sera contrôlée au cours des essais. En cas de constatation sur deux essais consécutifs d'un écart de plus de 30 kN par rapport à la valeur d'effort obtenue sur le premier point d'essais (si l'écart est constaté sur 1 seul essai, ce dernier sera considéré comme un point aberrant), une nouvelle valeur de H_I devra être déterminée.

Remarque: dans la pratique, ce processus revient à déterminer une hauteur H_1 *par section homogène.*

b) Cas où aucune charge cible n'a été communiquée

En l'absence de valeur de charge cible (due à l'absence de données de trafic suffisamment précises par exemple, ou parce que la chaussée s'avère largement surdimensionnée par rapport au trafic reçu), une déflexion cible $d_{IRéf}$ sera recherchée. Cette valeur est $d_{IRéf} = 700 \ \mu m \pm 30 \ \mu m$.

Cette valeur arbitraire de 700 μm permet de :

- rester dans la gamme de mesure des géophones (0 à 2 mm),
- > rester dans des valeurs de déformations raisonnables pour une chaussée aéronautique,
- appliquer un effort suffisamment important pour produire une déformation mesurable par les géophones les plus éloignés.

Le même processus qu'en **a**) ci-dessus, mais avec la déflexion comme cible cette fois (tolérance $50 \ \mu m$ par rapport à la déflexion sur le premier point), est suivi.

4.4.3. Choix d'une chute de préchargement

La chute de préchargement est choisie, pour chaque essai, égale à H_1 :

$$\Sigma = H_0 + \sum_{i=1}^2 n_i \times H_i \quad \text{avec:}$$

 $H_0 = H_1$ pour tout point d'essai p.

4.4.4. Choix d'une séquence

Sauf indication contraire, la non-linéarité sera étudiée à partir de deux niveaux de déformation (S = 2), i.e. en réalisant la séquence suivante :

 H_1 la chute de référence, déterminée en 4.4.2.

$$H_0 = H_1$$

$$H_2 = H_1 / 4$$

▶
$$n_i = 3$$
, $\forall i$

Le ratio $H_2 = H_1 / 4$ correspond approximativement d'après [Broutin, 2010] à un ratio $F_2 = F_1 / 2$, F_1 et F_2 étant respectivement les efforts associés aux hauteurs de chute H_1 et H_2 .

4.4.5. Options de filtre

La plupart des matériels proposent par défaut d'appliquer un filtre passe-bas à 60 Hz lors de l'acquisition des signaux d'effort et de déflexion. Au vu des spectres présentés en Figure 4, l'application d'un tel filtre est de nature à altérer de manière significative les résultats d'essais (valeurs maximales sensiblement diminuées; forme des signaux temporels modifiés).

Il est préconisé de désactiver ce filtre.

4.5. Réalisation d'un essai

4.5.1. Protocole d'essais

Les essais doivent être réalisés conformément au protocole d'utilisation de l'appareil, et en respectant la séquence de mesures définie en 4.4. ci-dessus.

Une attention particulière devra être portée durant les essais aux signaux enregistrés. Tout signal manifestement erroné, ou toute valeur aberrante devront alerter l'opérateur qui devra recommencer l'essai.

4.5.2. Fichier de suivi

Un fichier de suivi sera rempli consciencieusement au cours de chaque campagne d'essais. Toute anomalie constatée (fissures, ornières,...) ou remarque d'intérêt (essai refait, changement de configuration matérielle,...) devront être consignées dans ce fichier.

4.5.3. Nomenclature des résultats

Une nomenclature claire doit être définie afin d'assurer la traçabilité des essais. Les noms de la plateforme et de l'aire étudiée ainsi que la date seront méthodiquement répertoriés.

5. Interprétation des résultats bruts

5.1. Analyse critique des résultats

Cette étape consiste à:

- vérifier l'allure générale des signaux,
- > vérifier la répétabilité entre les différentes chutes d'une même séquence,

▶ analyser la linéarité du comportement de la chaussée vis-à-vis de la charge, en étudiant les modules apparents [Ullidtz, 1987].

5.1.1. Détection de résultats aberrants – forme du signal

Une observation de l'allure des signaux temporels permet de vérifier leur cohérence. Les cas de signaux aberrants sont multiples. Il peut par exemple s'agir de problèmes d'intégration par le HWD des signaux mesurés par les géophones entraînant des valeurs de déflexions ne revenant pas à zéro, voire partant vers l'infini en fin d'essai (Figure 17).



Figure 17: Acquisition des déflexions par le HWD – Exemple de signal aberrant.

5.1.2. Répétabilité entre les différentes chutes d'une même séquence

La répétabilité sera vérifiée sur les maxima. Les écarts mesurés sur chaque géophone entre les valeurs de deux des n_i chutes de chaque séquence devront vérifier les conditions suivantes :

$$e_{R} = \max_{k,i,j} \left| d_{k} \max_{chute_{i}} - d_{k} \max_{chute_{j}} \right| < 15 \ \mu m \tag{Eq. 4}$$

$$e_{R}\% = \max_{k,i,j} \frac{\left| d_{k} \max_{chutei} - d_{k} \max_{chutej} \right|}{\min_{l=1...n_{l}} d_{k} \max_{chutel}} < 3\%$$
(Eq. 5)

où $d_k \max_{chute i}$ est la déflexion maximale mesurée lors de la i^{ème} chute sur le k^{ème} géophone, et n_i le nombre de chutes de l'essai considéré.

Une valeur supérieure à cette limite provient généralement d'un résultat incohérent par rapport à ceux des autres chutes. Il est donc préconisé d'écarter la chute aberrante de l'analyse.

La Figure 18 présente les bassins de déflexions des différentes chutes d'un essai type, normalisés par rapport au bassin de déflexion de la première chute, et permet d'apprécier (déflexions maximales mesurées sur la première chute égales au premier ordre aux $min d_k max_{chute l}$) l'écart e_R % relatif à cet essai qui est inférieur à 1 %. e_R est quant à lui égal à 7 μm .

Remarque: afin d'éviter au maximum ce post-traitement fastidieux, la plus grande vigilance est requise durant l'auscultation. En cas de non respect des seuils e_R ou e_R % détecté par l'opérateur, il est préconisé de réaliser à nouveau l'essai, sur le même point, en respectant une minute de temps de repos, en position « pied du HWD relevé ».



Figure 18: Acquisition des déflexions HWD – Vérification de la bonne répétabilité.

Si la bonne répétabilité est vérifiée, il est possible de choisir arbitrairement n'importe laquelle des chutes pour la phase d'analyse. Toutefois, l'utilisation de la dernière chute est préconisée car les écarts (minimes) constatés sur la Figure 18 proviennent vraisemblablement d'effets de fluage, non considérés dans le modèle purement élastique proposé, qui se stabilisent au cours du temps.

5.1.3. Étude de linéarité

L'étude de la linéarité vis-à-vis de l'effort appliqué est réalisée (Figure 19) en superposant les courbes de modules de surface pour deux efforts distincts ($F_2 = 2 \times F1$, i.e. en première approximation $H_2 \sim 4 \times H_1$), les modules de surface étant définis ainsi:

$$E_{1} = \frac{f \times (1 - v^{2}) \times a \times p}{d_{1}}$$

$$E_{i} = \frac{(1 - v^{2}) \times a \times p}{d_{i}} \times \frac{a}{r} = \frac{(1 - v^{2}) \times a^{2} \times p}{d_{i} \times r} \quad \text{pour tout } i \neq 1$$
(Eq. 6)

avec d_i la déflexion mesurée par le i^{eme} géophone, a le rayon de la plaque, p la pression, r la distance au centre de la plaque de chargement, et f un facteur dépendant de la distribution de pression sous la plaque; le Tableau 6 présente les valeurs proposées dans [Ullidtz, 1987]:



Tableau 6: Facteur de distribution de pression pour le calcul des modules de surface.

La valeur de f = 2 est préconisée pour l'étude du HWD. En effet, la pression sous la plaque de chargement est uniformisée grâce à la présence d'un caoutchouc sous cette dernière, et à l'utilisation d'une plaque segmentée (Photo 4).



Figure 19: Utilisation des modules de surface pour la détermination de la linéarité.

Les deux critères suivants sont retenus pour juger de la linéarité : il convient que l'erreur e_L définie comme la moyenne des moindres carrés, rapportée au nombre de géophones *m*, calculée suivant la formule (Eq. 7) soit inférieure à 50 μ m, ou que l'erreur e_L % définie la formule (Eq. 8) soit inférieure à 20 %.

$$e_{L} = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^{m} (E_{k}(F_{2}) - E_{k}(F_{1}))^{2}}{m}}$$
(Eq. 7)
$$e_{L\%} = \sqrt{\frac{1}{m} \cdot \sum_{k=1}^{m} \left(\frac{E_{k}(F_{2}) - E_{k}(F_{1})}{E_{k}(F_{2})}\right)^{2}}$$
(Eq. 8)

Remarques:

I'utilisation de ces deux critères permet de juger l'ensemble des cas d'étude, y compris les cas extrêmes. Ainsi le critère en termes de pourcentages d'erreurs, qui s'avère plus explicite que le critère en déflexions, n'est plus pertinent lorsque les déflexions deviennent trop faibles, notamment pour les géophones éloignés.

• dans le cas où aucun des deux critères ne serait atteint, il est recommandé de corriger les déflexions expérimentales maximales, en interpolant (linéairement par défaut) les valeurs de modules de surface entre les deux valeurs d'effort, et d'appliquer la même correction aux historiques de déflexion par homothétie verticale, sans toucher à l'axe des abscisses temporelles.

Dans l'exemple considéré, e_L = 8,2 μm , et $e_L = 0,3$ %. Le comportement de la structure peut donc être considéré comme linéaire.

5.2. Zones homogènes

La détermination des zones homogènes repose sur une analyse croisée des résultats de la méthode des sommes cumulées (ou CUSUM pour *CUmulative SUMmation*) [Page, 1954] réalisée à partir des déflexions maximales mesurées sur le géophone central du HWD, des relevés de dégradations et des mesures au géoradar.

5.2.1. Détermination par CUSUM

La méthode CUSUM d'étude de l'évolution de l'homogénéité des résultats lors d'une série d'essais permet le découpage de la zone étudiée en zones homogènes vis-à-vis du paramètre étudié.

Dans le cas du HWD, les points d'essais sont repérés sur une piste ou une voie de circulation par une abscisse spatiale suivant l'axe de la piste ou de la voie de circulation, par rapport à une origine fixée arbitrairement à l'une de ses extrémités (voir 4.2.); dans la pratique, les chaînages rentrés lors des essais, et figurant dans les fichiers de résultats correspondent à ces abscisses.

Notons P_i le $i^{\text{ème}}$ point d'essais, et V_i la valeur du paramètre étudié, lue ou calculée à partir des résultats expérimentaux en ce point.

La méthode CUSUM, dans sa version simplifiée (on se limitera à celle-ci dans le cadre de ce guide) se met en œuvre de la manière suivante :

1) Classement des points selon les abscisses X_i croissantes (i.e. attention pour les points « retour » qui devront être classés « à l'envers »),

2) Calcul de la série:

$$S(P_{1}) = 0$$

$$S(P_{2}) = S(P_{1}) + V_{2} - \overline{V}$$
....
$$S(P_{n+1}) = S(P_{n}) + V_{n+1} - \overline{V}$$
....
(Eq. 9)

Avec \overline{V} la moyenne des V_i (ici les valeurs d₁max de déflexions maximales sur le géophone central) sur l'ensemble des points d'essais réalisés sur l'aire étudiée.

La Figure 20 montre un exemple d'application de la méthode CUSUM sur un jeu de valeurs collectées par le STAC lors d'une auscultation de piste.

L'évolution des S(Pi) montre clairement :

- > Quatre sections quasiment linéaires caractéristiques de zones homogènes Z1 à Z4,
- > Trois ruptures de pente caractéristiques de la frontière entre ces zones homogènes.



Figure 20: Exemple de détermination des zones homogènes via la méthode CUSUM réalisée sous PREDIWARE.

Détermination des zones homogènes

5.2.2. Analyse croisée avec les relevés de dégradations et le géoradar

La mise en application de cette méthode sur des cas pratiques d'auscultation de pistes a démontré que les zones obtenues par l'analyse CUSUM sont assez fidèlement expliquées par des changements de structures repérés à l'aide du géoradar, mais que la méthode n'est pas assez discriminante, certaines variations non négligeables de structure ne se traduisant pas par des variations de comportement significatives. Inversement, certaines zones homogènes en termes d'épaisseur peuvent être structurellement hétérogènes par endommagement non uniforme des matériaux sur l'ensemble de la section.

Il est donc préconisé de croiser les informations issues des deux méthodes, ainsi que les enseignements du dernier relevé de dégradations.

L'exemple présenté en 7.2 illustre la méthode proposée.

5.2.3. Création d'un fichier expérimental HWD « type »

Sur chaque zone homogène, un seul calcul inverse (voir 6.3.) sera réalisé en considérant un point représentatif de la zone, tout en intégrant une marge de sécurité.

Pour ce faire, la moyenne des maxima de déflexion mesurés sur chacun des géophones pour les N points d'essai de la zone, ainsi que l'écart type correspondant sont calculés. Leur somme permet de calculer, pour chacun des m géophones utilisés pour le calcul inverse, les déflexions maximales « moyennes hautes » :

$$dMH_k \max = \overline{d_k \max(n)} + \sigma(d_k \max(n)) , \forall k = 1..m$$
(Eq. 10)

où $M_k = \overline{d_k \max(n)}$ est la moyenne des résultats obtenus sur les N points d'essais de la zone homogène, et n=1,..,N

 $S_k = \sigma(d_k \max(n))$ l'écart type correspondant. ______

Le point d'essai représentatif de la zone, qui sera utilisé pour le calcul inverse, est alors celui dont le bassin de déflexion est le plus proche du bassin de déflexion « moyen haut », bassin fictif reconstitué à partir des déflexions maximales calculées d'après Eq. 10.

L'écart est mesuré à l'aide de la méthode des moindres carrés. Il est défini par :

$$e_d = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^{m} (d_k \max - dMH_k \max)^2}{m}}$$
 (Eq. 11)

où $d_k max$ est la déflexion maximale mesurée sur le géophone k pour le point considéré, et $dMH_k max$ la moyenne haute sur la zone homogène.

Remarques:

• il est préconisé de considérer systématiquement la dernière chute de chaque série pour la valeur de $d_k max$. Ce choix arbitraire n'a aucune incidence sur le résultat au vu de la très bonne répétabilité des essais, vérifiée en 5.1.2.

• dans le cas où la zone homogène considérée comporte moins de 5 points d'essais, la notion d'écart type n'est pas pertinente. Il est alors préconisé de considérer le point présentant la déflexion centrale maximale la plus élevée.

• on rappelle que les points aberrants ont préalablement été écartés de l'analyse (voir 5.1.1.).

6. Interprétation des essais

6.1. Modèle mécanique

La méthode préconisée repose sur des calculs aux éléments finis. L'analyse dynamique doit être réalisée dans le domaine temporel.

La modélisation repose sur un maillage 2D axisymétrique stratifié, composé d'éléments quadratiques à 8 nœuds. Un maillage typique pour une chaussée souple aéronautique (couche de roulement (CR) en béton bitumineux aéronautique (BBA), couche de base (CB) en grave bitume (GB), couche de fondation (CF) en grave non traitée de type B (GNT B) et sol support) est présenté en Figure 21. Il inclut la plaque de chargement. Cette dernière, dont la géométrie est respectée, est constituée d'acier et est supposée parfaitement collée à la surface de la chaussée.





6.1.1. Géométrie et conditions aux limites

La géométrie générale du maillage à respecter, décrite dans ce paragraphe, a été déterminée à l'aide d'une étude d'optimisation [Broutin, 2010] dont seuls les résultats sont présentés ici.

a) Dimensions du maillage

L'étendue latérale "L" du maillage a été optimisée afin d'éviter toute réflexion indésirable sur la paroi externe du maillage, qui conduirait à fausser les résultats d'analyse. La précision recherchée dans cette étude était 1 μm de déplacement au niveau du géophone le plus éloigné. Les résultats ont conduit à établir la condition suivante : $L \ge 6 m$.

La hauteur "H" du modèle correspond à la profondeur de substratum. Une étude de sensibilité menée en amont [Broutin, 2010] a montré sur une structure typique qu'un substratum plus profond que 6 m n'avait aucune incidence sur les résultats du HWD. La condition suivante est donc retenue : $H \ge 6 m$.

b) Épaisseurs des couches

Les épaisseurs des couches du maillage doivent être ajustables et correspondre aux épaisseurs réelles des matériaux constitutifs de la chaussée. Comme expliqué plus haut, les épaisseurs des couches de surface doivent être préalablement déterminées à l'aide des historiques et de campagnes de géoradar et de carottages. La profondeur de substratum est obtenue par calcul (voir 6.2). Si cette dernière est supérieure à 6 m, la couche de sol s'étend jusqu'au bas du maillage. Dans le cas contraire une couche de matériau infiniment rigide ($E = 200\,000$ MPa) est introduite.

c) Discrétisation spatiale

Pour limiter les temps de calcul, une étude a été menée [Broutin, 2010] afin d'optimiser la discrétisation spatiale du maillage. La précision sur les déplacements recherchée dans cette étude était le μm .

Sur la base des résultats obtenus, les contraintes imposées horizontalement sont :

• une longueur d'élément ΔX 1 sous la plaque de chargement constante, de 1,5 cm,

• une longueur maximale d'éléments jusqu'à une distance de 1,50 m du centre de chargement de 5 cm avec une progression géométrique entre ces deux valeurs,

• une longueur maximale d'éléments entre les distances de 1,50 m et 2,40 m du centre de chargement de 10 cm avec une progression géométrique entre ces deux valeurs,

• une longueur maximale d'éléments au-delà de 50 cm avec une progression géométrique entre ces deux valeurs.

La valeur cible des raisons géométriques est de $1,15 \pm 0,03$ afin de limiter toute rigidification artificielle du milieu qui introduirait des réflexions indésirables.

Les contraintes verticalement sont:

- > couche de roulement: hauteur maximale des éléments: 2 cm,
- couche de base: hauteur maximale des éléments: 3,5 cm,
- > couche de fondation : hauteur maximale des éléments : 10 cm,
- ▶ sol: hauteur de 10 cm pour l'élément de surface; hauteur maximale de 50 cm en profondeur avec progression géométrique de raison 1,15 ± 0,03 entre les deux.

Par simplification, et afin d'éviter les approximations, il convient de placer des nœuds :

- ▶ au droit de chaque géophone ($X=X_i$; Z=0),
- ▶ à chaque interface (X=0; $Z=-\sum e_i$, avec e_i les épaisseurs des couches surjacentes).

d) Conditions aux limites

Les conditions aux limites décrites sur la Figure 21 sont les suivantes :

- déplacement radial nul sur la limite extérieure du maillage,
- déplacement vertical nul sur la partie inférieure.

Remarque: pour des raisons de symétrie, le déplacement radial est imposé nul sur l'axe.

6.1.2 Sollicitation

La sollicitation externe du modèle est l'effort appliqué sur la plaque d'essai, mesuré en continu par le capteur d'effort intégré au pied du HWD.

Ce dernier est approximé par une fonction créneau (effort constant sur chaque intervalle de temps δt défini en 2.4.2 (voir (Eq.2)), correspondant à l'effort mesuré en début d'intervalle, et calcul mécanique avec reprise), comme présenté sur la Figure 22.



Temps [s]

Figure 22 : Modélisation de l'effort.

La pression p(t) est choisie constante sur la plaque de chargement; des simulations ont montré que cette hypothèse n'avait pas d'influence sur les résultats, au vu de la rigidité de la plaque.

La discrétisation temporelle a été optimisée [Broutin, 2010]. Il est préconisé (dans l'hypothèse d'une fréquence d'acquisition f = 4 kHz par voie de mesure, soit un pas d'échantillonnage de 0,25 ms) de retenir un pas de temps sur trois, i.e. de choisir $\delta t = 0,75$ ms.

6.1.3. Résolution mathématique

a) Équations locales

Les matériaux sont supposés présenter un comportement isotrope élastique linéaire.

L'évolution du système est donc gouvernée par les lois de la dynamique régulière :

$$\overrightarrow{div\sigma} + \overrightarrow{f} = \overrightarrow{\rho\gamma} \quad \text{dans } \Omega$$

La discrétisation en éléments finis du problème conduit à l'expression classique suivante :

$$M \ddot{u}(t) + K u(t) = P(t)$$

avec *M* et *K* respectivement les matrices de masse et de rigidité, u(t) le vecteur déplacement au temps *t*, et P(t) le vecteur contenant les efforts extérieurs.

(Eq. 12)

(Eq. 13)

Le terme générique (i, j) de M_{ij} est une fonction des densités ρ_i du matériau et le terme générique (i, j) de K_{ij} est une fonction des modules d'Young E_i et des coefficients de Poisson v_i du matériau.

De l'amortissement peut être pris en compte dans le modèle. Il s'agira d'amortissement de Rayleigh, global sur la structure.

Son introduction consiste à ajouter dans les équations locales ci-dessus un terme $C \dot{u}(t)$ avec C une matrice, appelée matrice d'amortissement, définie comme une combinaison linéaire de M et K:

$$M \ddot{u}(t) + C \dot{u}(t) + K u(t) = P(t)$$

$$C = \alpha M + \beta K$$
(Eq. 14)
(Eq. 15)

avec α et β des scalaires appelés coefficients de Rayleigh et liés pour toute pulsation ω_i au coefficient d'amortissement ξ_i par la relation:

$$\xi_i = \frac{1}{2} \left(\frac{\alpha}{\omega_i} + \beta \mathsf{X} \omega_i \right)$$
(Eq. 16)

La Figure 23 présente une courbe d'amortissement typique.



Figure 23: Relation pulsation/amortissement.

Afin de déterminer les valeurs de α et β permettant d'obtenir un amortissement le plus proche possible de ξ = $X % = \xi_{moyen}$, sur une plage donnée $[\omega_I, \omega_2] = 2\pi \times [f_{rés}, 60$ Hz] par défaut, une minimisation de la moyenne des moindres carrés sur cette plage est réalisée.

b) Conditions d'interface

Les couches sont supposées parfaitement collées ou parfaitement décollées.

Le décollement est modélisé par l'ajout à l'interface d'un groupe d'éléments de type relations linéaires, d'épaisseur un élément.

6.2. Détermination de la profondeur de substratum

La méthode de détermination de la profondeur de substratum p_{subst} adoptée est celle proposée par [Foinquinos Mera, 1995]. L'étude menée dans [Broutin, 2010] a montré que cette méthode était bien plus précise et robuste que les méthodes pseudo-statiques telles que [Irwin, 2002].

Il s'agit d'une méthode dynamique faisant appel au calcul de la fréquence de résonance de la structure *fr*, et à l'analyse fréquentielle des signaux d'effort sous la plaque, et de déflexion sur le géophone le plus éloigné.

Plus précisément, il convient de calculer la fonction de réponse en fréquence (FRF en anglais) G(f) définie par:

$$G(f) = \frac{\left|FFT(d_{ext}(t))\right|}{\left|FFT(F(t))\right|}$$
(Eq. 17)

avec F(t) l'effort mesuré par le capteur du HWD intégré à la plaque de chargement, $d_{ext}(t)$ le déplacement mesuré par le géophone le plus éloigné (celui déporté à 5 m, i.e. le G₁₇ ou G₁₈ dans le cas particulier de la configuration STAC), et FFT(F(t)) et $FFT(d_{ext}(t))$ les modules des transformées de Fourier rapides (FFT) correspondantes.

Cette fonction présente un maximum atteint pour une certaine fréquence correspondant à la fréquence de résonance fr de la structure; cette dernière est directement liée au module élastique du sol, et à la profondeur de substratum, l'incidence des couches de surface étant supposée négligeable loin du centre d'application de l'effort.

Soit fr la fréquence de résonance relative au géophone extérieur. En l'absence d'amortissement trop important, cette dernière satisfait les relations approchées suivantes :

$$\frac{f_r}{f_s} = \begin{cases} \frac{V_P}{V_s} = \sqrt{\frac{2(1-\nu)}{(1-2\nu)}} & \text{si} \quad 0 \le \nu \le 0.2 \\ 1.63 + 1.9(\nu - 0.20) & \text{si} \quad 0.2 < \nu \le 0.3 \\ 1.82 + 1.06(\nu - 0.30) & \text{si} \quad 0.3 < \nu \le 0.47 \\ 2.0 + 5.0(\nu - 0.47) & \text{si} \quad 0.47 < \nu \le 0.5 \end{cases}$$
(Eq. 18)

avec V_S et V_P respectivement les vitesses de propagation des ondes S et P dans le sol support, v son coefficient de Poisson, et f_s la fréquence fondamentale de l'onde de cisaillement.

(Eq. 19)

Remarque: pour les matériaux granulaires, v est forfaitairement choisi égal à 0,35.

On aboutit à :

$$\frac{f_r}{f_s} = 1,873$$

51

La fréquence fondamentale de l'onde de cisaillement est liée à la profondeur de substratum p_{subst} par la relation suivante :

$$f_s = \frac{V_s}{4p_{subst}}$$
(Eq. 20)

avec

$$V_s = \sqrt{G/\rho} = \sqrt{E_s/(2\rho(1+\nu))}$$
 (Eq. 21)

 ρ , v, G et E_S étant respectivement la masse volumique, le coefficient de Poisson, le module de cisaillement, et le module d'Young du sol.

Ainsi, en combinant Eq. 20 et Eq. 21, p_{subst} peut s'écrire :

$$p_{subst} = \frac{\left(f_r/f_s\right)}{4f_r} \sqrt{\frac{E_s}{2\rho(1+\nu)}}$$
(Eq. 22)

Dans cette expression, (fr/fs) est déduit de Eq. 19 et f_r correspond au pic observé sur la fonction de transfert (Figure 24) calculée à partir des données expérimentales, tandis que ρ et v sont supposées connues.



Figure 24: Détermination de la fréquence de résonance fr de la chaussée.

Cependant, *E*_S est aussi une inconnue du problème.

La méthode de résolution repose donc sur un processus itératif. Tout d'abord, E_S est initialisé à la valeur $E_{S 0}$, en réalisant un calcul inverse « sans substratum », i.e. avec un sol de profondeur « infinie » (dans la pratique, 6 m), en ne s'intéressant qu'au géophone extérieur.

Remarque: les modules élastiques des couches supérieures sont choisis « arbitrairement », i .e. à dires d'experts ou à partir d'une base de données matériaux.

Une valeur $p_{subst 0}$ de profondeur de substratum est alors déterminée à l'aide de (Eq. 22).

Un nouveau calcul inverse est réalisé avec comme profondeur de substratum la valeur $p_{subst 0}$. Le résultat permet de déterminer une valeur de module $E_{S I}$. Une nouvelle valeur de p_{subst} est déterminée à l'aide de Eq. 22: $p_{subst I}$, etc...

Le processus s'arrête après stabilisation de E_s et p_{subst} (Figure 25). Le critère d'arrêt retenu est :



Avec $p_{subst N-1}$ et $p_{subst N}$ les valeurs respectives de la profondeur de substratum calculées aux étapes N-1 et N du processus, et e_H (%) l'erreur cible retenue. Le STAC préconise la valeur de e_H = 1,5 % qui correspond à une précision de 10 cm ou mieux sur la profondeur de substratum.



Figure 25: Évolution de la profondeur de substratum p_{subst} et du module du sol E_s au cours de l'algorithme.

6.3. Algorithme de calcul inverse

L'algorithme de Gauss Newton, succinctement rappelé en 6.3.2., est utilisé pour la résolution. Il convient de garder un œil critique sur les résultats du calcul inverse. La procédure suit les trois étapes suivantes :

- > Définir des paramètres d'entrée (cohérents) pour le calcul,
- Lancer l'algorithme,
- > Vérifier la cohérence des paramètres rétrocalculés.

6.3.1. Données d'entrée

a) Choix des paramètres rétrocalculés

Il est possible de ne réaliser le calcul inverse que sur certains paramètres, les autres étant arbitrairement fixés.

L'utilisation de cette option est limitée au cas où un ou plusieurs paramètres sont bien connus.

Par abus de langage, le terme « paramètres » sera utilisé dans la suite afin de désigner les paramètres rétrocalculés.

b) Paramètres initiaux

Un jeu de paramètres initiaux \vec{E}^{o} doit être choisi. Les valeurs les plus réalistes possibles doivent être retenues. En effet, même si la robustesse de l'algorithme présenté ci-dessous a été démontrée dans [Broutin, 2010], un choix judicieux de ces paramètres permet de limiter le nombre d'itérations nécessaires à la convergence, et donc les temps de calcul.

Le choix repose sur des données matériaux issues d'essais en laboratoire (voir 3.2.) si ces derniers sont disponibles, ou à défaut sur la connaissance de valeurs moyennes pour les matériaux considérés dans les conditions d'essai (température notamment), à l'aide par exemple de bases de données matériaux faisant référence à la norme NF EN 13108-1 [AFNOR, 2007b].

c) Bornes de l'intervalle de variation

Un intervalle de variation est choisi pour chaque paramètre du calcul inverse, afin de le garder dans une gamme de valeurs réalistes.

Le choix des intervalles relatifs aux modules d'Young peut lui aussi s'appuyer sur des bases de données matériaux.

L'ordre de grandeur des amortissements structurels dans les matériaux est de 3 à 5 % dans le sol et les matériaux granulaires, et de 15 à 30 % dans les matériaux bitumineux suivant la température, pour des températures standard. Ces valeurs seront préconisées. Dans le cas d'un amortissement moyen, global pour la structure, l'intervalle 5 – 15 % est préconisé.

d) Erreurs cibles et nombre d'itérations

Une erreur cible ainsi qu'un nombre maximal d'itérations doivent être choisis par l'opérateur. L'obtention d'un de ces critères constitue une condition d'arrêt de l'algorithme de convergence (voir ci-dessous).

Nombre maximal d'itérations

Le nombre maximal d'itérations est par défaut fixé à 20.

Erreur cible

On définit l'erreur *e* suivante :

$$e = \sqrt{\frac{\sum_{st=st\min}^{st\max} \sum_{k=1}^{m} q_k \left(w_k \left(\vec{E}, \vec{H}, \vec{v}, r_k, p, a, st \right) - d_k (st) \right)^2}{m \cdot (st_{\max} - st_{\min})}}$$
(Eq. 24)

Une erreur cible e_c doit être retenue. Le choix de cette erreur doit être cohérent avec les précisions expérimentales, et celles du modèle numérique. Une étude de répétabilité couplée avec une étude de sensibilité a été menée dans [Broutin, 2010] et a permis d'établir la valeur cible suivante:

 e_c = 15 μm

Les précisions attendues sur les modules respectifs des différentes couches, avec ce choix de e_{cr} sont données dans 6.4 ci-dessous.

e) Choix de la fenêtre temporel pour le calage

L'intervalle de temps choisi pour le calage est [10 ms; 40 ms], ce qui correspond à la "partie utile" du signal, i.e. aux pics principaux de déformation.

6.3.2. Résolution

Trouver le minimum de f_t est équivalent à rendre son gradient nul, i.e. :

$$\forall j \in [1;n], f_t j(\vec{E}) = \sum_{st=st\min}^{st\max} \sum_{k=1}^m q_k \left(w_k(\vec{E}, st) - d_k(st) \right) \times \frac{\partial w_k}{\partial E_j} = 0 \quad \text{(Ej)} \quad \text{(S1)}$$

Remarque: la simplification par le pas de temps δt a été réalisée pour alléger les formules.

Le système (S1) constitué des $n(E_j)$ équations est résolu en utilisant l'algorithme de Gauss Newton. Cette méthode repose sur un processus itératif qui consiste à 1 – choisir un jeu de données initial, 2 – mettre à jour le jeu de données à chaque étape du processus, 3 – stopper le processus quand un critère de convergence prédéfini est atteint.

a) Initialisation

Un jeu de données \vec{E}^{0} est choisi arbitrairement (voir 6.3.1.b ci-dessus).

b) Résolution de l'étape N

Soit \vec{E}^{N-1} le jeu de paramètres au début de l'étape N. Appelons ce jeu "jeu de paramètres de référence de l'étape N".

Chacune des (E_j) équations est résolue en utilisant la méthode de Newton. Celle-ci nécessite de résoudre à chaque étape du processus itératif le système (S2):

$$S^N \cdot d\vec{E}^N = \vec{R}^N \tag{S2}$$

avec $S^{\mathbb{N}}$ la matrice réelle de taille $n \times n$ et de terme générique (i, j):

$$S_{ij}^{N} = \sum_{st=st\,\text{min}}^{st\,\text{max}} \sum_{k=1}^{m} q_k \frac{\partial w_k}{\partial E_i} \frac{\partial w_k}{\partial E_j} \tag{Eq. 25}$$

et \vec{R}^N et $d\vec{E}^N$ les vecteurs colonnes de taille *n* dont les *j*^{èmes} coordonnées sont respectivement :

$$\vec{R}_{j}^{N} = -\sum_{st=st\min}^{st\max} \sum_{k=1}^{m} q_{k} \left(w_{k} \left(\vec{E}^{N}, t \right) - d_{k} \left(t \right) \right) \times \frac{\partial w_{k}}{\partial E_{j}}$$
(Eq. 26)

et

$$\vec{dE}_j = dE_j \tag{Eq. 27}$$

S^{*N*} est appelée matrice de sensibilité (ou matrice Hessienne). *R*^{*N*} est appelé vecteur reste.

Dans la pratique, le calcul approché des dérivées est réalisé à l'aide de la méthode des différences finies (Eq.28):

$$\forall j \in [1; n], \ \frac{\partial w_k}{\partial E_j} \approx \frac{w_k \left(E_1^{N-1}, \dots, E_j^{N-1} + \Delta E_j^N, \dots, E_n^{N-1} \right) - w_k \left(E_1^{N-1}, \dots, E_j^{N-1}, \dots, E_n^{N-1} \right)}{\Delta E_j^N}$$
(Eq. 28)

 $w_k \left(E_1^{N-1}, \dots, E_j^{N-1}, \dots, E_n^{N-1} \right)$ est la k^{ime} déflexion calculée en utilisant les paramètres de référence, tandis que $w_k \left(E_1^{N-1}, \dots, E_j^{N-1} + \Delta E_j^N, \dots, E_n^{N-1} \right)$ est la k^{ime} déflexion calculée en introduisant une

une perturbation ΔE_i^N sur le j^{ime} paramètre.

Cela implique n+1 calculs directs à chaque étape de l'algorithme.

La résolution du système (S2) n'est pas présentée ici (disponible dans [Broutin, 2010]). Elle est basée sur une décomposition singulière de la matrice réelle symétrique *S*, combinée avec une méthode de régularisation afin d'éviter toute instabilité de l'algorithme de convergence.

$$\vec{E}^N = \vec{E}^{N-1} + d\vec{E}^N$$

(Eq. 29)

c) Mise à jour des paramètres

À la fin de l'étape N, le jeu de paramètres de référence est mis à jour en lui ajoutant $d\vec{E^{N}}$:

à condition que chaque coordonnée E_j^N reste dans l'intervalle défini en 6.3.1 c-; dans le cas contraire, cette coordonnée reste inchangée.

d) Fin du processus

Le processus est poursuivi jusqu'à ce que l'une des deux conditions suivantes soit remplie :

- l'erreur cible est atteinte,
- le nombre maximal d'itérations est atteint.

6.3.3. Vérification de la cohérence des résultats

Un œil critique doit être gardé sur les résultats. Des modules réalistes doivent être obtenus. Les données complémentaires sur la chaussée dont le chargé d'études dispose sont prépondérantes.

6.4. Précisions estimées des résultats

Si le protocole ci-dessus est respecté, en particulier la réalisation d'une reconnaissance au géoradar couplée avec des carottages pour la détermination des épaisseurs de chaussée, ainsi que le nombre minimal de points d'essais sur chaque zone homogène (5) et le nombre de chutes minimal de chaque séquence (3), et enfin l'utilisation de la méthode dynamique de calcul inverse, les incertitudes finales pour une probabilité de 68 % sur les modules rétrocalculés sur chaque zone sont:

- > 400 MPa pour la couche de roulement,
- > 750 MPa pour la couche de base,
- ▶ 10 MPa pour la couche de fondation,
- ▶ 1 MPa pour le sol support.

Ces résultats ont été obtenus à l'aide d'une étude de répétabilité des essais, couplée avec une étude numérique de sensibilité. L'ensemble des développements sont disponibles dans [Broutin, 2010].

Remarque: les études de répétabilité et sensibilité ont été menées sur la structure souple de la planche d'essais instrumentée du STAC, représentative des chaussées aéronautiques pour gros porteurs.

7. Exemples d'application

Deux exemples sont présentés dans cette partie, à titre d'illustration de la méthode d'auscultation proposée.

Le premier, axé sur la partie calcul inverse, s'appuie sur la campagne d'essais réalisée sur la planche d'essais instrumentée du STAC, en novembre 2011; un calcul inverse est tout d'abord réalisé à partir des déflexions de surface d'un essai HWD représentatif, et les modules rétrocalculés analysés et comparés aux valeurs attendues. Les déformations critiques sont dans un second temps calculées, et comparées aux résultats enregistrés par les capteurs de la planche.



Le second, présentant la méthodologie globale d'auscultation d'une plateforme, s'appuie sur une auscultation de piste réalisée en février 2013 par une équipe mixte STAC/PCI Chaussées aéronautiques. L'ensemble de la démarche est décliné, depuis la détermination des zones homogènes par méthode CUSUM couplée aux résultats de l'auscultation au géoradar jusqu'au calcul inverse réalisé sur le point représentatif d'une de ces zones.

L'ensemble des calculs ont été réalisés à l'aide du logiciel PREDIWARE [PREDIWARE, 2013] (Photo 12).

Photo 12: Future interface de la version diffusable de PREDIWARE.

7.1 Exemple 1: exploitation d'essais réalisés sur la planche instrumentée du STAC

7.1.1. Présentation de la campagne d'essais

La planche d'essais instrumentée du STAC (Photo 13), décrite en détails dans [STAC, 2012], comprend entre autres une chaussée souple représentative d'une chaussée aéronautiques gros porteurs dont la structure est présentée en Figure 26. Elle comporte 3 bandes instrumentées PS_1 à PS_3 respectant le canevas de la Figure 27.



Photo 13: La planche instrumentée du STAC durant sa construction.



(Profondeur de substratum : > 6 m)



Remarque: en réalité une couche de forme constituée de GNT A de 85 cm protège le sol support, de portance relativement faible. Un sol homogène sera néanmoins considéré dans la modélisation.

Les épaisseurs de chaussée sont connues avec précision grâce aux résultats d'une campagne de géoradar et de carottages.



Figure 27: Canevas d'instrumentation d'une bande instrumentée (PS_1) de la chaussée souple de la planche d'essais instrumentée du STAC.

Chaque bande instrumentée comporte, répartis sur les 4 lignes d'instrumentation L_1 à L_4 , 5 types de capteurs permettant de mesurer les déformations critiques dans la chaussée sous sollicitation extérieure qui sont les déformations horizontales d'extension, longitudinales et transversales, à la base de la couche de matériaux bitumineux (capteurs de type L et T), et les déformations verticales de contraction au sommet des couches de matériaux non liés, i.e. la plateforme support de la chaussée, et les couches inférieure et supérieure de GNT B mise en œuvre en deux couches (capteurs de type S, B et H).

L'expérimentation de novembre 2011 a consisté à réaliser des essais HWD sur l'ensemble des capteurs, en respectant les canevas d'essais suivants :



Tableau 7: Canevas des points d'essais pour chaque capteur L ou T.



• Capteurs de type B ou H:

Tableau 8: Canevas des points d'essais pour chaque capteur B ou H.

• Capteurs de type S:



Tableau 9: Canevas des points d'essais pour chaque capteur S.

Remarque: pour des raisons de diffusion des efforts dans la structure, plus les capteurs sont profonds, moins les points d'essais sont resserrés autour du capteur, mais plus la zone de test est en revanche étendue.

Deux types d'études sont possibles :

- I le travail en lignes d'influence (déplacement du point d'application de la charge par rapport aux points de mesure (les capteurs) et non le contraire) pour reconstituer des « bassins de déformation » à partir des maxima enregistrés sur chaque point d'essai des canevas des Tableaux 7 à 9,
- l'analyse des évolutions temporelles.

Dans les deux cas, la fiabilité des résultats repose sur l'hypothèse d'une structure homogène, tant en termes d'épaisseur des matériaux que de propriétés mécaniques de ces derniers. Ces dernières sont influencées de manière significative pour les matériaux bitumineux par la température.

Les essais ont donc été réalisés de nuit, période où la température dans la chaussée est la plus stable. Chaque ligne d'instrumentation a fait l'objet d'une nuit d'essais, la température au milieu de la couche de matériaux bitumineux restant constante à 1 °C près au cours de la nuit, autour de 10 °C.



Photo 13: HWD du STAC lors de la campagne d'essais de novembre 2011 sur la chaussée instrumentée souple.



Les Figures 28 et 29 présentent la réponse du capteur sol $1S_{01}$ (bande PS_1) à un essai HWD réalisé à sa verticale :

Figure 28: Réponse d'un capteur sol $(1S_{01})$ sous chargement HWD; vue générale.



Figure 29: Réponse d'un capteur sol (15₀₁) sous chargement HWD; vue détaillée de la réponse au premier rebond de la première chute.

7.1.2. Opérations préalables

a) Choix d'un essai HWD de référence

La dispersion entre les mesures HWD est très faible. Le point d'essai réalisé à l'abscisse 0 de la ligne L_1 (nommé « Point 0 » dans la suite) est retenu comme référence.

b) Choix d'un jeu de capteurs de référence

Les Figures 30 à 33 montrent respectivement les évolutions des déformations mesurées par les capteurs sous chargement HWD (plaque de chargement centrée au dessus du capteur) pour les capteurs de types S, B, H et L et T (l'orientation du capteur n'ayant aucune influence sur la mesure en position centrée), de la bande PS₃. Il apparaît que la dispersion entre les différents capteurs d'un même type est faible, excepté pour les capteurs de types L et T.



Figure 30: Dispersion des mesures des capteurs; évolution de la déformation verticale de contraction au sommet du sol sous chargement HWD.



Figure 31: Dispersion des mesures des capteurs; évolution de la déformation verticale de contraction au sommet de la couche inférieure de GNT B sous chargement HWD.

Il est donc possible de choisir arbitrairement un capteur de chaque type comme référence pour la validation *in-situ* menée dans la suite de l'étude. Les capteurs $3S_{04}$, $3B_{06}$ et $3H_{01}$ sont retenus.

Remarque: un « bouclage » consistant à refaire en fin de nuit le premier point de chaque ligne a été réalisé, afin de vérifier que les faibles variations de température dans la structure ont eu une influence négligeable sur le comportement de la structure; les résultats se sont avérés concluants.



Figure 32: Dispersion des mesures des capteurs; évolution de la déformation verticale de contraction au sommet de la couche supérieure de GNT B sous chargement HWD.



Figure 33 : Dispersion des mesures des capteurs; évolution de la déformation horizontale de traction à la base des matériaux bitumineux sous chargement HWD.

7.1.3. Étude de linéarité et détermination de la profondeur de substratum

Les études de vérification de la linéarité et de détermination de la profondeur de substratum ont déjà été réalisées lors d'une étude précédente. La Figure 19 du paragraphe 5.1.3. relatif à l'étude de non-linéarité est d'ailleurs issue de cette étude.

La profondeur de substratum trouvée est de 11 m > 6 m. Le sol est donc considéré comme infini, et la valeur de 6 m est retenue dans le modèle conformément à 6.1.1.

7.1.4. Calcul inverse

Un calcul inverse est réalisé à partir des déflexions enregistrées sur le Point 0 de PS₃.

a) Paramètres d'entrée

Le calcul inverse a été réalisé sur l'ensemble des modules d'Young, à amortissement global pour la structure fixé à ξ = 10 %.

Les déflexions issues des géophones 1 à 13 sont utilisées pour le calage.

Les modules initiaux choisis pour le BBA et la GB3 correspondent aux valeurs de modules de matériaux neufs standard à (10 °C; 30 Hz), soit respectivement 8300 et 14000 MPa. Le sol est estimé à 100 MPa (milieu de la gamme PF2 QS) et un rapport de 3 est considéré pour les modules des couches de GNT par rapport aux couches sous-jacentes (règle standard de choix des modules dans un dimensionnement, dans le cas d'une GNT de classe 1). Le Tableau 10 rassemble l'ensemble des résultats.

Remarque: la robustesse de l'algorithme de convergence utilisé a été démontrée dans [Broutin, 2010]. Un choix judicieux des paramètres initiaux permet donc essentiellement d'accélérer la convergence.

Couche	Valeur initiale des module (Ei, 0)	Borne inférieure de variation E _{i min}	Borne supérieure de variation E _{i max}
BBA	8300	2000	20000
GB3	14000	2000	20000
GNT B (1)	600	150	1000
GNT B (2)	300	50	1000
Sol	100	20	200

Tableau 10: Calcul inverse; $PS_3 L_1$, point 0.

La fenêtre temporelle de calage retenue est [10;40 ms], et 1 pas de temps sur 3 ont été considérés conformément à 6.1.2.; le nombre maximal d'itérations est N = 20, et l'erreur cible e_C = 15 μm .

b) Temps de calcul

Le calcul inverse est réalisé sur 5 paramètres (les 5 modules d'Young du Tableau 10). Chaque itération du calcul inverse sous PREDIWARE nécessite donc la réalisation de 5+1 = 6 calculs directs sous CESAR.

Le temps global (i.e. y compris lecture des résultats intermédiaires, mise à jour des paramètres,...) de réalisation du calcul PREDIWARE pour l'ensemble des 20 itérations est de 32 minutes sur ce maillage, sur un ordinateur portable Dell Latitude E6520, de processeur Intel Core i7 – 2760QM, 2,40 Ghz, avec 16 Go de RAM.

c) Calage obtenu

La Figure 34 présente les résultats du calage.

Par souci de lisibilité, seules les déflexions issues des géophones central et distants de 40, 60, 150 et 210 cm du centre de chargement (géophones G_1 , G_3 , G_7 , G_{10} et G_{12}) sont représentées.



L'erreur finale obtenue est de e = 13,1 μm et le calage est considéré comme correct.

Figure 34: Résultat du calage; PS₃ L₁; point 0.

d) Modules rétrocalculés

Les modules rétrocalculés sont donnés dans Tableau 11.

Couche	BBA	GB	GNT B (1)	GNT B (2)	Sol
Module final(10°C; 30Hz) [MPa]	12000	15000	180	200	200

Tableau 11: Résultat du rétrocalcul; Bonneuil, PS₃L₁; point 0.

7.1.5. Cohérence des résultats

a) Cohérence avec les valeurs de modules attendues

L'ensemble des résultats obtenus sont cohérents.

Les modules des matériaux bitumineux sont cependant sous-estimés par rapport aux données des essais de laboratoire. Des essais de modules complexes ont été réalisés sur les matériaux de la planche instrumentée. Les valeurs respectives de modules obtenues pour (10 °C; 30 Hz) sont 16500 et 21800 MPa pour le BBA et la GB.

Remarques: ces valeurs sont plus élevées que les modules donnés pour les BBA et GB3 standard, respectivement de 8300 et 14000 MPa pour ce couple température/fréquence de sollicitation.

Deux explications peuvent être avancées pour expliquer ce phénomène. Tout d'abord les essais réalisés en laboratoire, sur éprouvettes non confinées, ne sont pas parfaitement représentatifs du comportement in situ du matériau, et d'autre part la modélisation ne tient pas compte de la viscoélasticité des matériaux bitumineux.

Les estimations des modules des couches de sol et de GNT B sont réalistes, même si on s'attendrait à ce que le module de la GNT soit supérieur à celui du sol.

b) Cohérence avec les valeurs de déformations mesurées par les capteurs

Un calcul direct est réalisé à partir des modules rétrocalculés à l'étape précédente.

La Figure 35 compare les déformations obtenues au sommet du sol et des deux couches de GNT B avec les valeurs mesurées par les capteurs $3S_{04}$, $3B_{06}$ et $3H_{01}$.



Figure 35: Comparaison des déformations numériques et expérimentales.

Pour chacune des déformations considérées, les signaux numérique et expérimental sont similaires, aussi bien en termes d'amplitude qu'en termes de temps d'impulsion.

Remarque: en revanche, la déformation calculée pour les matériaux bitumineux est assez éloignée des valeurs expérimentales: 128 μ défs. L'écart ne s'explique pas par le fait que le capteur mesure une déformation moyenne sur 10 cm; en effet, le fait d'appliquer aux déformations numériques obtenues une moyenne flottante spatiale sur 10 cm ne réduit que d'environ 1 % l'amplitude du signal. Le faible nombre de capteurs L et T utilisés dans cette expérimentation (3) combiné à la dispersion importante entre ces trois signaux suggère de ne pas les prendre en compte dans cette étude.

Ce premier cas pratique a permis d'illustrer les phases de calculs inverse et direct dynamiques.

7.2. Exemple 2: application de la méthode à l'auscultation d'une piste

Un exemple d'auscultation opérationnelle d'une piste est ici présenté. Les essais ont été réalisés de nuit (Photo 15).



Photo 15: HWD du STAC, de nuit, lors de l'auscultation d'une piste.

7.2.1. Configuration d'essais

L'analyse du trafic accueilli par la plateforme a permis d'identifier que l'avion dimensionnant est l'A320-200.

Ce dernier présente une charge à la roue de 18 tonnes (soit en considérant $g = 10 \text{ m.s}^2$ un effort appliqué à la chaussée de180 kN), et un demi entre-axe entre les atterrisseurs principaux (référence prise au centre du jumelage) de 3,79 m soit environ 4 m.

Il a donc été décidé de réaliser les essais à 4 m de l'axe, et de choisir (voir 4.4.2) $F_1 = F_{1Réf} \pm 10 \text{ kN} = 180 \text{ kN} \pm 10 \text{ kN}$.

Chaque essai comprend sur les points courants une chute de préchargement (choisie d'effort maximal $F_1/2$), suivie d'une série de trois chutes de mesure d'effort maximal F_1 . La non-linéarité et la profondeur de substratum sont étudiées sur un échantillonnage d'un point sur dix. Sur ces points particuliers, la barre déportée supportant les géophones G_{17} et G_{18} a été placée en début d'essai à 5 m du centre de la plaque, et une seconde série de trois chutes, d'effort maximal $F_{1,Réf}/2$ a été ajoutée à la séquence.

Le logigramme de l'annexe 1 a été suivi. L'effort calé sur le premier essai vaut F_1 =188,9 kN qui respecte bien 180 ± 10 kN. La tolérance de ± 30 kN par rapport à F_1 a été respectée pour l'ensemble de la campagne : toutes chutes confondues les valeurs minimale et maximale d'effort maximal sont respectivement 175,5 et 193,7 kN.

L'auscultation de la piste de 3 100 m a été réalisée en une nuit (4 heures d'intervention). La température au milieu des enrobés, stable au degré près durant toute la campagne de mesure, était de 13 °C.

7.2.2. Structures de chaussée

a) Détermination des zones homogènes

Campagne géoradar

Préalablement à la campagne d'essais au HWD, l'historique et des mesures radar calées sur quelques carottages ont permis de découper la piste en 11 sections homogènes (Tableau 12).

РМ	Épaisseur d'enrobés (cm)	Épaisseur de fondation (cm)	Données historiques
0-400	26.5	49	Allongement 1970
400-700	34	40	Allongement 1971
700-1000	42	40	Allongement 1961
1000-1660	27	32	Reconstruction 1980
1660-1800	35	34	Piste initiale
1800-1960	28	38	Piste initiale
1960-2080	20	43	Piste initiale
2080-2300	35	36	Piste initiale->2200, allongement 1964->2300
2300-2400	35	44	Allongement 1966
2400-2500	25	43	Allongement 1966
2500-3100	22	23	Allongement 1990

Tableau 12: Structures retunues pour les différentes zones homogènes.
Étude CUSUM

Les résultats de la méthode CUSUM, réalisée sur la valeur maximale de déflexion obtenue sur le géophone central (G1), sont tracés sur la Figure 36.



Figure 36 : CUSUM réalisé sur la déflexion maximale enregistrée sur le géophone central.

Des ruptures de pente sont clairement identifiées autour des PM 1000, 1660, 1760, 2080, 2280 et 2400. Une rupture de pente moins significative est distinguée autour du PM 700. En revanche, aucune rupture de pente n'est détectée aux PM 400 et 2500.

Il apparaît donc que le CUSUM est un outil pertinent pour identifier les zones homogènes d'une section étudiée, à partir des simples mesures de déflexion. Il s'avère cependant ne pas être assez discriminant pour identifier certains changements de zones.

Découpage

Cet exemple confirme donc la nécessité de coupler pour la détermination des zones homogènes d'une section d'étude, l'analyse CUSUM menée sur la déflexion centrale maximale avec les résultats de l'étude géoradar réalisée préalablement à l'auscultation.

Le croisement des deux informations permet d'obtenir un découpage fiable, confirmé par les historiques de chaussée (Tableau 12) et les carottages réalisés sur chacune des zones identifiées (voir ci-après).

Le découpage en 11 zones homogènes est retenu. L'analyse complète des données nécessite donc la réalisation de 11 calculs inverses, chacun mené sur un point d'essai représentatif de la zone.

b) Choix des points représentatifs

Il est décidé dans la suite de décliner à titre d'exemple l'ensemble de la phase d'analyse sur une zone homogène, à savoir la zone 400 - 700m.

Les déflexions moyennes hautes sont calculées conformément à 5.2.3., en utilisant les 13 premiers géophones de la barre de mesure principale (géophones G_{17} et G_{18} utilisés uniquement pour la détermination de la profondeur de substratum). Il apparaît que le point représentatif de la zone est le point 474, pour lequel l'écart e_d est le plus petit (20,7 μ m).

La Figure 37 présente les bassins de déflexion « minimal », « maximal », « moyen » (reconstitués respectivement à partir des valeurs minimales, maximales et moyennes sur l'ensemble des points d'essais de la zone des déflexions maximales pour chacun des géophones), « moyen haut » (reconstitué à partir des moyennes hautes sur l'ensemble des points d'essais de la zone des déflexions maximales pour chacun des géophones, calculées conformément à 5.2.3.), ainsi que le bassin de déflexion du point représentatif de la zone (point 474).



Figure 37: Choix d'un point représentatif de la zone homogène; bassin de déflexion du point représentatif vs bassins « minimal », « maximal », « moyen » et « moyen haut ».

La Figure 38 isole les bassins de déflexion « moyen haut » et celui du point représentatif. Il apparaît que le point 474 est bien représentatif de la zone homogène.



Figure 38: Choix d'un point représentatif de la zone homogène; bassin du point représentatif vs bassin « moyen haut ».

Le point 474 est donc retenu pour l'étude de la zone homogène considérée. Le calcul inverse sera réalisé sur ce point.

Ce point ne faisant pas partie des points singuliers sur lesquels ont été réalisés les essais complémentaires pour les études de non-linéarité et de détermination de la profondeur de substratum, le point singulier le plus proche (point 523) sera utilisé pour ces dernières.

c) Carottages

Des carottages ont été réalisés, à 4 m de l'axe, sur chacune des zones homogènes précédemment définies, permettant de disposer d'une connaissance précise des structures de chaussée et du collage des interfaces entre matériaux bitumineux. La carotte prélevée sur la zone homogène 400-700 permet de définir la structure de référence suivante:



Figure 39: Structure du point d'essais 474.

Les interfaces entre matériaux bitumineux s'avèrent parfaitement collées.

La structure de la figure 39 est retenue pour les développements qui suivent.

Remarque: Les deux couches de BBA de 9 cm ont volontairement été réunies en une seule couche pour la modélisation.

7.2.3. Analyses préliminaires

a) Linéarité

L'étude de linéarité est réalisée sur le point 523. Les modules de surface relatifs aux deux chargements F_1 et F_2 sont présentés sur la Figure 40.



Figure 40: Étude de linéarité réalisée sur le point 523.

La moyenne des moindres carrés entre les deux courbes donne $e_L = 34,1 \ \mu m$ et $e_L \ \% = 15,0 \ \%$, ce qui entre dans la tolérance.

La réponse de la structure sous chargement HWD peut donc être considérée comme linéaire.

b) Profondeur de substratum

La détermination de la profondeur de substratum est elle aussi réalisée sur le point 523.

Les déflexions obtenues à l'aide des géophones G_{17} et G_{18} , placés à 5 m du centre de la plaque de chargement sont utilisés.

La Figure 41 présente les FRF obtenues pour ces géophones. Ces deux FRF sont similaires, et présentent un pic pour la valeur de 25 Hz qui est retenue comme fréquence de résonance de la structure.

La Figure 42 présente les résultats de l'algorithme itératif appliqué pour déterminer la profondeur de substratum.

Les modules retenus pour la couche de BBA et celle de GB sont des valeurs standard à (13 °C; 30 Hz), soit respectivement 7 200 et 12 300 MPa; le module retenu pour le module de la GNT B est de 300 MPa.

Remarque: ces valeurs ont une très faible incidence sur le résultat, les signaux de déflexion mesurés à 5 m de la charge étant majoritairement influencés par le module du sol support.



L'algorithme converge au bout de 6 itérations ($e_H = 0.98$ %). La valeur obtenue pour la profondeur de substratum, et retenue pour la phase de calcul inverse est de 3.27 m.

Figure 41 : Détermination de la fréquence de résonance de la structure à partir de la FRF Effort/Déflexion du géophone extérieur.



Figure 42: Détermination de la profondeur de substratum; résultat du calcul itératif.

7.2.4. Calcul inverse

a) Paramètres d'entrée

Le calcul inverse a été réalisé sur l'ensemble des modules, à amortissement fixé de ξ = 10 %.

Les déflexions issues des géophones 1 à 13 sont utilisées pour le calage.

Couche	Valeur initiale des module $(E_{i, 0})$	Borne inférieure de variation E _{i min}	Borne supérieure de variation E _{i max}
BBA	7200	2000	20000
GB	12300	2000	20000
GNT	300	50	1000
Sol	100	20	200

Le Tableau 13 répertorie les modules initiaux ainsi que les bornes de variation retenues.

Tableau 13: Calcul inverse réalisé au point 474; Modules initiaux et bornes de variation.

La fenêtre temporelle de calage considérée est [10-40 ms]; le nombre maximal d'itérations est N = 20, et l'erreur cible e_C = 15 μm .

b) Calage obtenu

Le calage obtenu est présenté sur la Figure 43.



Figure 43 : Résultat du calage ; point 474.

L'erreur finale obtenue est de e = 6,0 μm et le calage est donc considéré comme correct.

c) Modules rétrocalculés

Les modules rétrocalculés sont donnés dans Tableau 14.

Couche	BBA	GB	GNT B	Sol
Module final à (13°C; 30Hz) [MPa]	3300	8 600	180	113

Tableau 14: Résultat du rétrocalcul; point 474.

Ces résultats sont cohérents.

8. Terminologie

Sigles et abréviations techniques

▶ HWD	Heavy Weight Deflectometer; déflectomètre à masse tombante pour chaussées aéronautiques.
► IS	Indice de service : méthode d'évaluation superficielle et structurelle de la chaussée, basée sur des relevés visuels de dégradations.
► RSE	Roue Simple Equivalente.
▶ RSI	Roue Simple Isolée.
▶ PCN	Pavement Classification Number : nombre permettant d'évaluer la capacité portante d'une piste.
▶ DMI	Distance Measurement Instrument : mesureur de distance automatisé, intégré à l'appareil, permettant la localisation (abscisse curviligne) des points d'essais par rapport à une référence.

Sigles et abréviations fonctionnels

▶ STAC	Service technique de l'Aviation civile.
► IA	Département Infrastructures Aéroportuaires du STAC.
DER	Division études et recherche du département IA.
> OACI	Organisation de l'Aviation Civile Internationale.
▶ PCI	Pôle de Compétences et d'Innovation.

9. Références bibliographiques

▶ [AFNOR, 2004a] NF EN 12697-26: Mélanges bitumineux - Méthodes d'essai pour mélange hydrocarboné à chaud - Partie 26: module de rigidité, 2004.

▶ [AFNOR, 2004b] NF EN 13286-7: Mélanges avec ou sans liant hydraulique - Partie 7: essai triaxial sous charge cyclique pour mélanges sans liant hydraulique.

▶ [AFNOR, 2007a] NF EN 12697-24: Mélanges bitumineux - Méthodes d'essai pour mélange hydrocarboné à chaud - Partie 24: résistance à la fatigue, 2007.

▶ [AFNOR, 2007b] NF EN 13108 – 1: Mélanges bitumineux – Spécifications des matériaux – Partie 1: enrobés bitumineux, 2007.

• [AFNOR, 2010] NF EN 13285: Graves non traitées - Spécifications.

▶ [ASTM], "Standard Test Methods for Modulus and Damping of Soils by Resonant-Column" ASTM standard

▶ [Bretonnière, 1963] BRETONNIERE S. "Étude d'un déflectomètre à boulet" - Bulletin de liaison des laboratoires des Ponts et Chaussées n°2, 1963.

▶ [Broutin et al., 2008] BROUTIN M., CARON C., and DEFFIEUX J.C., "Dynamic versus static testing of airfield pavements: a full-scale experiment in France", European Road Review n° 13, Fall 2008, pp. 17-25.

▶ [Broutin, 2010] BROUTIN M. " Assessment of flexible airfield pavements using Heavy Weight Deflectometers. Development of a FEM dynamical time-domain analysis for the backcalculation of structural properties", PhD thesis, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, France, 2010.

• [Burmister, 1943] BURMISTER D.M "The theory of stresses and displacements in layered systems and applications to the design of airport runways" Proc., Highway Research Board, Vol.23, 1943.

• [COST, 1999] COST 336, "Falling Weight Deflectometer", Final report of the 1996 COST Action 336, 1999.

▶ [Dérobert et al., 2001] DEROBERT X., FAUCHARD C., COTE P. and GUILLANTON E. "Performances de radars d'auscultation des chaussées sur des sites tests", Bulletin de liaison des laboratoires des Ponts et Chaussées n° 230, jan.-fév. 2001.

▶ [Foinquinos Mera, 1995] FOINQUINOS MERA R., "Dynamic Nondestructive Testing of Pavements", Geotechnical Engineering Report GR95-4, Geotechnical Engineering Center, University of Texas at Austin, Austin, Texas, 1995.

▶ [GTR, 2000] "Réalisation des remblais et des couches de forme " (GTR) - Guide technique, LCPC - SETRA, 2000 (2^{ème} édition).

▶ [Irwin, 2002] IRWIN L.H. "Backcalculation: An Overview and Perspective", Proc., FWD User's Group Meeting, 2002.

▶ [LTPP, 2000] LUKANEN E.O., STUBSTAD R. and BRIGGS R. "Temperature predictions and adjustment factors for asphalt pavement", US Department of Transportation, Federal Highway Administration, Long Term Pavement Performance program, june 2000.

▶ [Page, 1954] PAGE E.S., "Continuous Inspection Scheme", Biometrika 41 (1/2), june 1954, pp 100-115.

▶ [PREDIWARE, 2013] PREDIWARE (Pavement Rational Evaluation using Deflections Induced by Falling Weights, for Airfield and Road Engineers): logiciel permettant le calcul des déflexions de surface et/ou des déformations dans la structure souple sous sollicitation HWD, ainsi que la réalisation de calculs inverses pseudo-statiques, ou selon la méthode dynamique du STAC. Version bêta, interne STAC développée en 2010; version diffusable à paraître début 2014, téléchargeable sur http://www.stac.aviation-civile.gouv.fr/chaussee/ausc_hwd.php

• [STAC, 2001] I.T.A.C (Instructions techniques sur les aérodromes civils).

▶ [STAC, 2009] Guide d'application des normes; enrobés hydrocarbonés et enduits superficiels pour chaussées aéronautiques,

http://www.stac.aviation-civile.gouv.fr/publications/

• [STAC, 2012] Manuel technique d'utilisation de la planche d'essais de Bonneuil,

http://www.stac.aviation-civile.gouv.fr/chaussee/pl_instrumentee.php

[STAC, 2013] Méthode rationnelle de dimensionnement des chaussées aéronautiques souples, guide technique, http://www.stac.aviation-civile.gouv.fr/

• [Ullidtz, 1987] ULLIDTZ P., Pavement analysis, Amsterdam, Elsevier, 1987.

Annexe : Logigramme de réalisation des essais

Valeur de charge cible F_{1Réf} communiquée par le chargé d'études ?



Conception: STAC/SINA groupe Documentation et diffusion des connaissances (DDC)

Couverture	© Michaël BROUTIN/Photothèque STAC		
Photos intérieures:	© Michaël BROUTIN/Photothèque STAC pages 12, 14, 15, 29, 59, 6		
	© Marie-Ange FROISSART/Photothèque STAC page 36		
	© Richard METZGER/Photothèque STAC page 62		
	$^{\odot}$ Isabelle ROSSI/Photothèque STAC pages 14, 25, 27, 28		
Illustration/Dessin :	© Michaël BROUTIN/STAC		
	© Jean-Baptiste TIGER/STAC		

Fevrier 2014



Centre de test de détection d'explosifs Centre d'essais de lancement de missiles - BP 38 40602 BISCARROSSE CEDEX Tél. 33 (0) 5 58 83 01 73 Fax 33 (0) 5 58 78 02 02

Site de Toulouse 31, avenue du Maréchal Leclerc 9, avenue du Docteur Maurice Grynfogel - BP 53735 31037 TOULOUSE CEDEX Tél. 33 (0) 1 49 56 83 00 Fax 33 (0) 1 49 56 83 02

service technique de l'Aviation civile CS 30012 94385 BONNEUIL-SUR-MARNE CEDEX Tél. 33 (0) 1 49 56 80 00 Fax 33 (0) 1 49 56 82 19

www.stac.aviation-civile.gouv.fr